

DOI: 10.7667/PSPC201740

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

戚宣威¹, 李露², 黄晓明¹, 王松¹, 袁愉涛³, 尹项根⁴

(1. 国网浙江省电力公司电力科学研究院, 浙江 杭州 310014; 2. 长沙理工大学电气与信息工程学院, 湖南 长沙 410076; 3. 国网浙江省电力公司, 浙江 杭州 310007; 4. 强电磁工程与新技术国家重点实验室(华中科技大学), 湖北 武汉 430074)

摘要: 2016年以来, 电网接连发生多起区外故障期间变压器差动保护误动的事件, 严重威胁电力系统的安全稳定运行与电能的可靠供应。从理论研究、数字仿真以及现场录波数据分析等层面围绕误动原因展开了深入研究, 结果表明P类互感器在区外故障期间发生暂态饱和是导致保护误动的主要原因。在此基础上, 分析论证了有关的互感器饱和识别方法, 并探讨了互感器选型需要考虑的多种因素。该研究旨在引起相关专家学者对于互感器暂态饱和问题的关注, 并为针对该问题的分析思路与应对方法提供参考与借鉴。

关键词: 电流互感器; 暂态饱和; 差动保护; 变压器

Study on the CT saturation and mal-operation of the transformer current differential protection during external faults

QI Xuanwei¹, LI Lu², HUANG Xiaoming¹, WANG Song¹, QIU Yutao³, YIN Xianggen⁴

(1. State Grid Zhejiang Electric Power Research Institute, Hangzhou 310014, China; 2. College of Electrical and Information Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410076, China; 3. State Grid Zhejiang Electric Power Company, Hangzhou 310007, China; 4. State Key Laboratory of Advanced Electromagnetic Engineering and Technology (Huazhong University of Science and Technology), Wuhan 430074, China)

Abstract: Several cases of unusual mal-operation of the differential protection for transformer occurred in the power grid in 2016, threatening the stable operation of the power grid and the reliability of the power supply seriously. The mal-operation reason is researched in detail based on the mathematical analysis, the digital simulation and the field recorded fault data analysis. It is disclosed that the P-class CT transient saturation leads to the mal-operation. On this basis, this paper analyses the performance of the CT saturation method, and discusses the CT selection principles. This paper aims at attracting the attention on the problem of the CT saturation and proposing the reference of the analysis method and the countermeasure for this problem.

Key words: current transformer; transient saturation; differential protection; transformer

0 引言

中国电网正在发展成为前所未有的交直流混联复杂大电网。高渗透率新能源发电集中接入、多回大容量直流馈入馈出以及含 FACTS 元件的新型交流输电方式使得电网中的电磁暂态过程更加复杂多

变, 系统的安全防护面临严峻考验。在发生短路故障期间, 这些复杂电磁过程将导致保护用互感器饱和并对二次测量量产生影响, 这使得差动保护误动事件频繁发生, 对电力系统及其设备的安全稳定运行带来严重威胁^[1-5]。

2016年以来, 电网接连发生多起区外故障期间互感器饱和导致变压器差动保护误动的事件, 这使得正常运行的变压器退出运行, 严重威胁电力系统的安全稳定运行与电能的可靠供应^[6-10]。本文从理

基金项目: 国家电网公司总部科技项目“基于故障暂态分量时频特征的线路保护原理研究”(5211DS17002J)

论研究、数字仿真以及现场录波数据分析等层面出发, 围绕误动原因展开深入研究: 根据互感器数学模型, 求解推导了短路暂态过程期间互感器的电磁过程, 定性分析了互感器饱和原因; 基于 Jiles-Atherton 铁芯磁滞理论, 结合现场实测互感器参数, 构建了高精度互感器仿真模型, 通过数字仿真复现并分析了互感器饱和过程; 结合现场保护动作情况以及录波数据验证了分析结论的正确性。在此基础上, 提出了继电保护的应对方法并探讨了互感器选型问题。

1 现场变压器保护误动事件分析

1.1 案例一

某正常运行的主变容量为 180 MVA, 额定电压分别为 230 kV/117 kV/35 kV, 绕组连接方式为 Y/Y/ Δ 11。在低压侧发生区外相间故障时, A 相电流差动保护动作, 导致该运行变压器退出运行。

根据差动保护动作期间保护装置的录波数据对误动原因展开分析。将变压器各侧 A 相二次线电流折算至高压侧, 且对高、中压两侧电流进行合成, 得到的变压器高、中压侧与低压侧二次电流的波形如图 1 所示。通过分析可见, 在发生区外故障期间, 变压器流过了幅值较大的穿越性的故障电流, 且该故障电流含有衰减非周期分量。对于变压器低压侧互感器, 此时故障电流工频分量约为 5~6 倍的额定一次电流(2 kA)。从 0.27 s 开始, 变压器低压侧 A 相互感器发生了暂态饱和, 导致二次电流发生畸变, 如图 1 所示。此时, 低压侧二次电流相对于高、中压侧发生了更为明显的畸变。这使得变压器差动保护开始出现虚假差动电流, 如图 2 所示, 该差动电流即为低压侧饱和互感器的传变误差电流。已知现场误动变压器的差动保护配置了二次谐波制动功能, 二次谐波制动系数整定为 0.15。通过傅里叶算法计算得到的差动电流二次谐波含量如图 3 所示, 在 0.04~0.05 s 期间, 差动电流的谐波含量低于整定值 0.15。在 0.04 s 时刻, 差动电流为 2.68 A, 制动电流为 5.01 A, 差动保护的差动/制动点如图 4 所示,

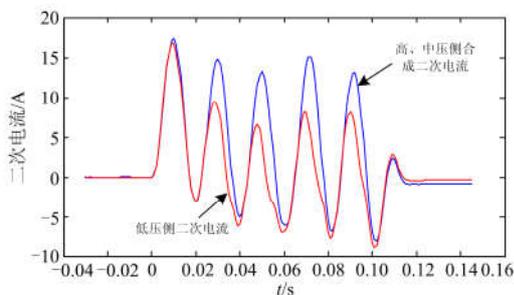


图 1 变压器差动保护动作期间各侧电流

Fig. 1 Currents of the transformer during the misoperation

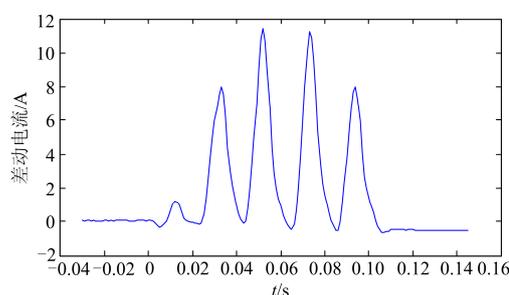


图 2 变压器差动电流

Fig. 2 Differential currents of the transformer

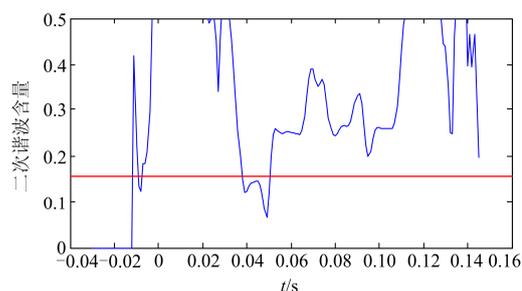


图 3 变压器差动电流谐波含量

Fig. 3 Harmonic component of the differential currents of the transformer

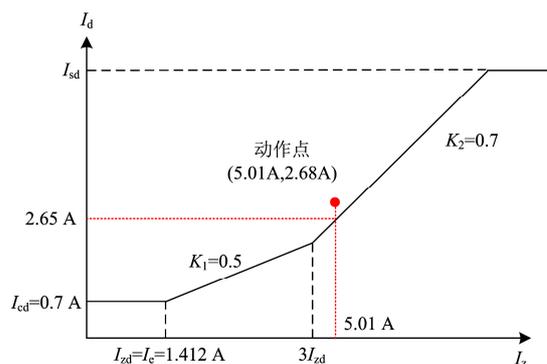


图 4 变压器差动保护的动点

Fig. 4 Operating point of the transformer differential protection

该点落入动作区内。此时, A 相差流大于定值、比例制动元件开放和三相二次谐波闭锁元件开放这 3 个条件同时满足, 导致差动保护动作。

1.2 案例二

与上述案例类似, 现场还出现多起区外故障期间变压器差动保护的误动事件。再介绍一起典型的事故案例。在变压器发生区外故障期间, 折算至高压侧的变压器高、中压侧以及低压侧 C 相二次电流如图 5 所示。通过分析可见, 由于故障电流幅值较大且含有非周期分量, 低压侧互感器发生了暂态饱和, 导致变压器差动电流增大, 如图 6 所示, 最终

导致了变压器差动保护误动。根据现场保护配置情况,该误动变压器配置了波形对称制动判据^[11]。如式(1)所示,该算法将差动电流的前半周波与后半周波进行比较计算。

$$\left| \frac{i_i + i_{i+180}}{i_i - i_{i+180}} \right| \leq A \quad (1)$$

式中: i_i 为某一时刻经过差分滤波后的差动电流瞬时值,为该时刻 10 ms 后的电流采样值; A 为整定系数,其取值范围为 2.5~4。

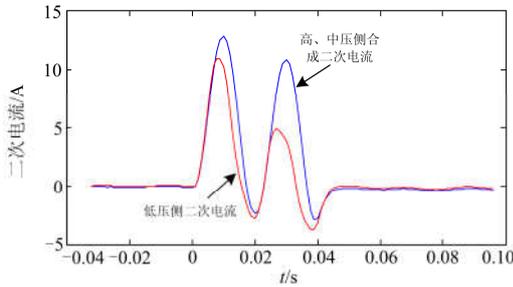


图 5 变压器差动保护动作期间各侧电流

Fig. 5 Currents of the transformer during the misoperation

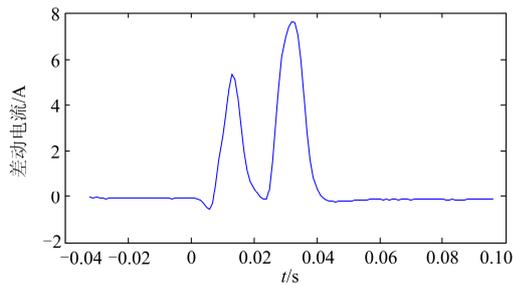


图 6 变压器差动电流

Fig. 6 Differential currents of the transformer

在一个工频周期内,根据式(1),将前后半周波的差动电流信号进行逐点比较,当满足式(1)的点数大于 0.6 倍的半周采样点数时,差动电流被判为是故障电流而非励磁涌流。

保护的录波数据在 0.35 s 时,差动/制动电流开始落入动作区内,如图 7 所示。此时开始启动波形对称识别程序(式(1)中的整定系数 A 取 2.5)。如图 8 所示。在 0.4 s 时,累计满足式(1)的点数大于 0.6 倍的半周采样点数(等于 6)。此时,差动保护动作。

通过上述分析可见,在发生区外故障期间,低压侧互感器在传变含有非周期分量的故障电流时发生暂态饱和,是差动保护误动的主要原因。现场变压器差动保护普遍采用的二次谐波制动判据以及波形对称判据主要用于判断励磁涌流,难以识别互感器饱和所产生的差动电流。为此,需要专门引入应

对互感器饱和的差动保护应对策略。

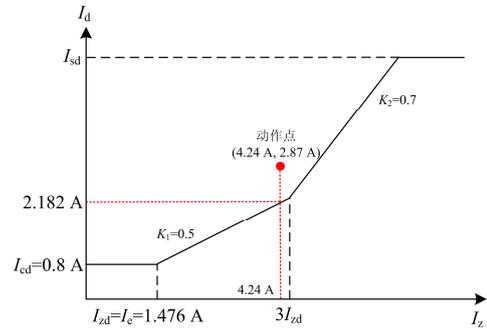


图 7 变压器差动保护的动作用点

Fig. 7 Operating point of the transformer differential protection

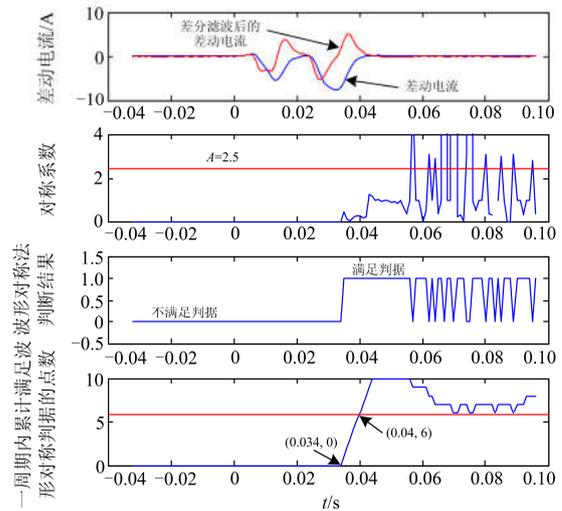


图 8 波形对称原理计算结果

Fig. 8 Differential currents of the transformer using wave symmetry principle

2 互感器饱和过程数学解析

为了进一步分析保护误动的原因,对案例一中所提的区外故障期间互感器饱和过程进行理论分析计算。分析思路为:采用工频量与按指数衰减的非周期分量之和拟合实际的一次短路电流,假设互感器铁芯为不饱和电感,根据一次电流的解析表达式以及互感器等值回路,求解得到互感器铁芯计算磁通的大小,将计算磁通与饱和磁通进行比较,从而得到互感器开始进入饱和状态的时间。

如图 1 所示,在区外故障过程期间高、中压侧互感器尚未发生饱和,高、中压侧二次电流的合成值(记为 $i_{H,M}$)畸变较小,忽略该两侧互感器的传变误差,可以将 $i_{H,M}$ 乘以变比 K_n 等效为低压侧互感器的一次电流。采用工频分量与衰减非周期分量对该电流进行拟合,结果如式(2)所示。

$$i_p(t) = \sqrt{2}I_{psc} \left[e^{-t/T_p} \cos \theta - \cos(\omega t + \theta) \right] = \sqrt{2} \times 14000 \times \left[e^{-t/0.05} \cos(-5^\circ) - \cos(\omega t - 5^\circ) \right] \text{A} \quad (2)$$

将式(2)所示的表达式与 $i_{H,M} \times K_n$ 进行对比, 如图 9 所示。可见, 该两条曲线十分吻合, 故式(2)可以等效为低压侧互感器一次电流的解析表达式。

采用 Omicron 互感器测试仪对案例一所提变压器低压侧 A 相电流互感器的基本参数进行测试, 结果如表 1 所示。根据如图 10 所示的互感器等值电路, 假设互感器的励磁铁芯为不饱和电感且其剩磁为零, 计算得到的互感器励磁铁芯磁通解析如式(3)所示, 其时域计算结果图 11 所示。

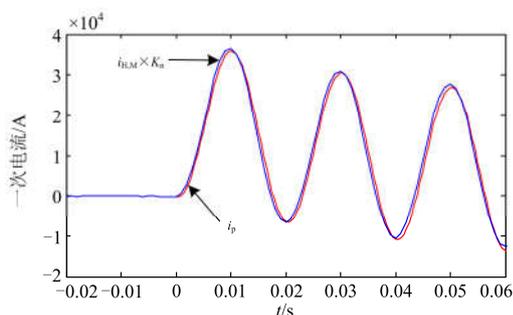


图 9 拟合一次电流对比图

Fig. 9 Comparison curve of the fitted primary current

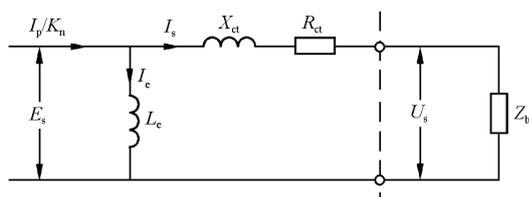


图 10 互感器等值电路图

Fig. 10 Equivalent diagram of the CT circuit

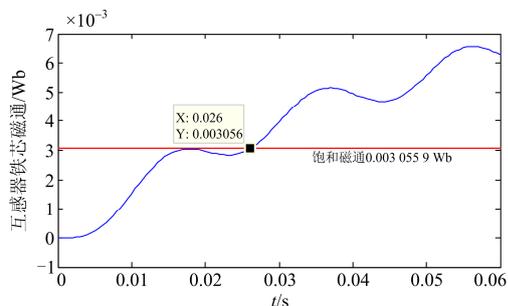


图 11 互感器铁芯磁通的计算结果

Fig. 11 Calculation result of CT iron core magnetic flux

$$\phi = \frac{\sqrt{2}I_{psc} T_s R_s}{K_n N_s} \left[\frac{T_p}{T_p - T_s} \left(e^{-\frac{t}{T_p}} - e^{-\frac{t}{T_s}} \right) \cos \theta + \frac{\sin \theta e^{-\frac{t}{T_s}} - \sin(\omega t + \theta)}{\omega T_s} \right] = \left[-0.01032 \times e^{-\frac{t}{0.05}} + 0.01026 \times e^{-\frac{t}{7.57}} - 0.0006552 \sin(100\pi \times t - 5^\circ) \right] \text{A} \quad (3)$$

表 1 互感器参数测试结果

Table 1 Test results of the CT parameters

变比 K_n	二次绕组匝数 N_s	铁芯不饱和 电感 L_c /H	二次绕组电阻 R_{ct} /Ω
400	400	12.596	0.863
额定负载电阻 R_{bn} /Ω	额定二次回路 时间常数 T_{sn} /s	实际负载电 阻 R_b /Ω	实际二次回路 时间常数 T_s /s
1.6	5.1	0.6	8.585

根据互感器测试仪的测量结果, 已知互感器的饱和磁通为 3.0559×10^{-3} Wb。由图 11 可见, 互感器铁芯磁通将在 0.026 s 时将进入饱和状态。根据图 1 所示的现场录波数据, 在故障后 0.26 s 开始, 变压器低压侧互感器发生了暂态饱和, 导致二次电流发生畸变。可见, 通过理论分析计算与实际录波得到的互感器进入饱和时间十分吻合。

通过理论分析可见, 在发生短路过程期间, 由于一次电流中含有衰减非周期分量, 使得互感器铁芯开始逐渐累积偏磁, 最终导致互感器铁芯磁通进入饱和区, 互感器发生暂态饱和。

3 互感器饱和和数字仿真研究

在 PSCAD 仿真平台中基于 JA 模型构建高精度的互感器数字暂态仿真模型^[12], 以复现案例一中的误动事件, 分析影响互感器饱和的各个因素。互感器的相关参数根据现场实测结果设定。在案例一中, 发生暂态饱和的变压器低压侧的 A 相互感器励磁特性曲线如图 12 所示, 采用模拟遗传算法对 JA 模型的参数进行拟合^[13], 得到的励磁特性曲线对比见图 12。根据互感器的实测剩磁系数(51%)对 JA 模型其余的相关参数进行估计, 得到的互感器磁滞回线如图 13 所示, 其剩磁磁通为 1.52×10^{-3} Wb, 剩磁系数约为 49.7%。JA 模型的相关参数拟合结果如表 2 所示。

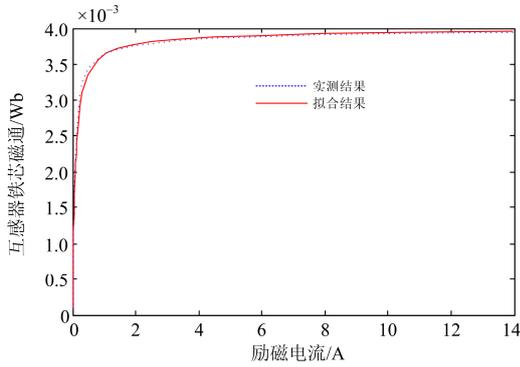


图 12 互感器励磁特性曲线

Fig. 12 Exciting characteristic curves of CT

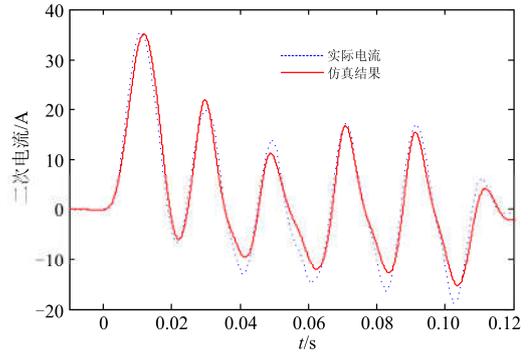


图 14 互感器饱和仿真结果

Fig. 14 Simulation result of CT saturation

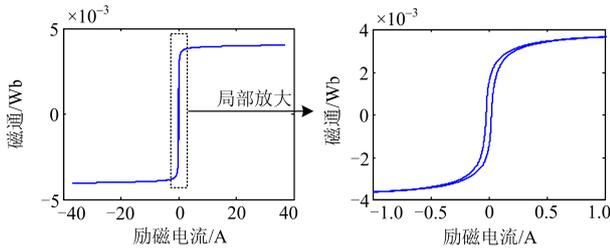


图 13 互感器磁滞回线

Fig. 13 Hysteresis loop of CT

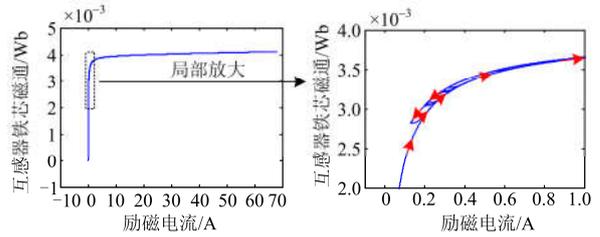


图 15 互感器磁滞回线仿真结果

Fig. 15 Simulation result of CT hysteresis loop

表 2 互感器 JA 模型参数拟合结果

Table 2 Fitted parameters of the CT model based on JA theory

饱和磁通 M_s/T	可逆磁化 系数 c	不可逆磁 化系数 k	修正 系数 β	域间耦合 系数 α
2.491×10^6	0.1	1.4×10^{-5}	0.90	2.002×10^{-5}
励磁特性曲线特征参数				
a_1	a_2	a_3	b	
723	1161	37 557	1.43	

在仿真试验中，将高、中压侧二次电流 $i_{H,M}$ 乘以变比 K_n 等效为流入低压侧互感器的一次电流。将该一次电流作为互感器模型的输入值，仿真模型输出的二次电流与实测结果对比见图 14。通过分析可见，仿真与实测得到的饱和互感器二次电流十分吻合。通过仿真得到的互感器磁滞回线如图 15 所示。通过分析可见，在区外故障期间，互感器铁芯开始逐渐累积偏磁，导致发生暂态饱和。

通过改变仿真参数，修改互感器的铁芯剩磁，分别为饱和磁通的 $\pm 50\%$ ，得到的仿真结果对比见图 16，通过分析可见：当剩磁与故障电流产生的偏磁相同时(即剩磁为 $+50\%$ 的饱和磁通)，互感器将更快进入饱和状态；反之，则互感器更不易饱和。

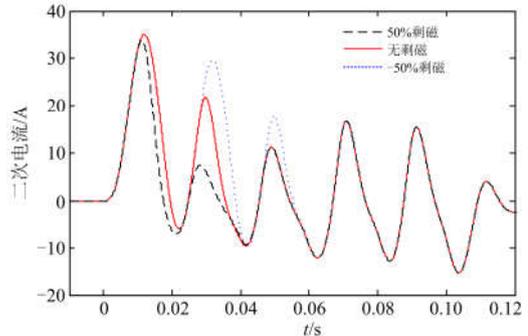


图 16 不同剩磁情况下互感器二次电流仿真结果

Fig. 16 Simulation result of CT secondary current with different remnant flux

4 改进策略

针对上述保护误动情况，相关保护厂家对差动保护的判据进行了修改，增加了互感器饱和和识别功能。其方法为根据低压侧互感器二次电流的谐波含量判断互感器的饱和，并在互感器发生饱和情况下通过调整差动保护的制动特性以提高保护可靠性，具体实现判据为：当低压侧电流采样大于全容量计算的低压侧额定电流的 $1/3$ 时，如判出 2 次谐波或 3 次谐波含量大于基波的 15% ，比例差动定值门槛抬高到 1.2 倍高压侧额定电流，拐点变为 1.5 倍高压侧额定电流，制动特性直线变为斜率 0.8 且过原点

的单折线。

针对图 1 和图 5 中所示的误动案例, 在保护误动期间低压侧二次电流的二次和三次谐波含量如图 17 和图 18 所示。通过分析可见, 在互感器发生饱和期间, 由于低压侧二次电流波形发生畸变, 其二次或三次谐波含量将会大于 15%, 故通过提高保护的动作用阈值以及制动系数可以有效避免保护误动, 如图 19 和图 20 所示。采用该改进方案的保护装置已通过数字动模以及现场误动波形回放的检测, 并

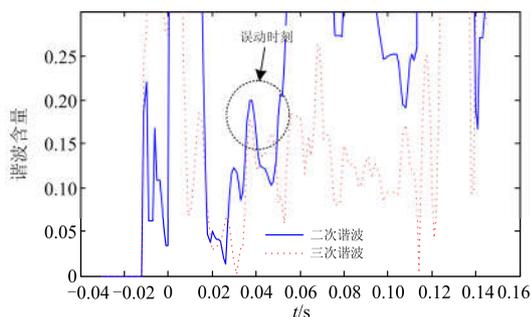


图 17 案例一中饱和互感器二次电流量谐波含量
Fig. 17 Harmonic component of the CT secondary current in CASE 1

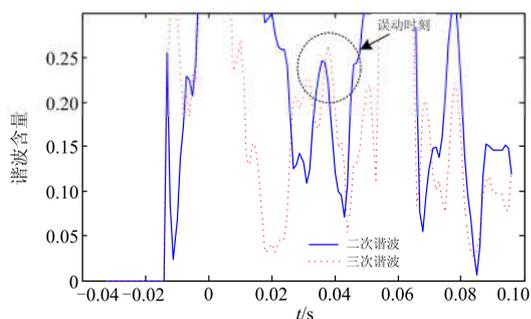


图 18 案例二中饱和互感器二次电流量谐波含量
Fig. 18 Harmonic component of the CT secondary current in CASE 2

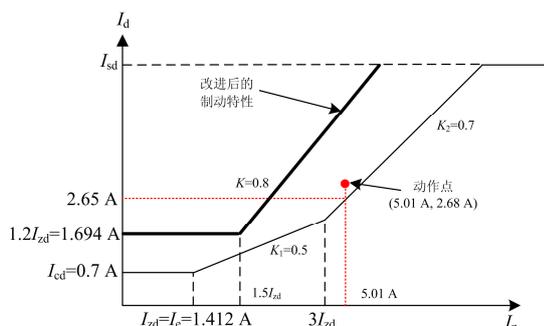


图 19 通过修改制动特性防止差动保护误动(案例一)
Fig. 19 Method for preventing the misoperation by modifying the restraint characteristic (CASE 1)

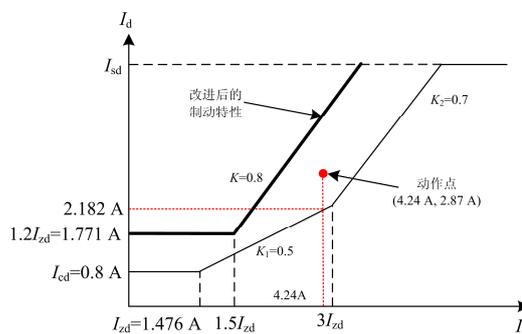


图 20 通过修改制动特性防止差动保护误动(案例二)
Fig. 20 Method for preventing the misoperation by modifying the restraint characteristic (CASE 2)

已重新投入现场运行。但是, 在当变压器低压侧负荷电流含有较大的谐波含量, 或者发生内部故障期间, 流过低压侧二次电流的谐波含量也会较高。谐波法易导致互感器饱和的误判, 而降低变压保护对于内部故障的灵敏度。

根据目前互感器的选型配置, 在故障发生后互感器至少能够线性传变 3~5 ms 才进入饱和状态。因此也可以采用时差法或者附加制动区法识别互感器饱和^[14]。

如图 1 和图 5 所示, 在区外故障发生 0.27 s 和 0.07 s 后, 互感器才发生饱和而导致差动电流增加, 而制动电流将随着穿越性故障电流的出现而迅速增大, 因此可以根据差动电流与制动电流出现的时间差判断互感器饱和。

在区外故障期间, 差动/制动电流的动作轨迹如图 21 和图 22 所示。在故障初期, 由于互感器尚未饱和, 差动电流较小, 而制动电流迅速增加, 动作点将首先向右运动。随着互感器逐渐进入饱和状态, 动作点才进入动作区。因此通过在差动保护动作特性中增设附加制动区, 可以有效识别互感器饱和。

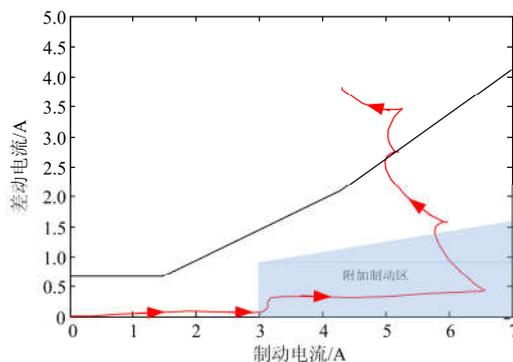


图 21 通过引入附加制动区识别互感器饱和(案例一)
Fig. 21 Method for CT saturation detection based on the add-on stabilization (CASE 1)

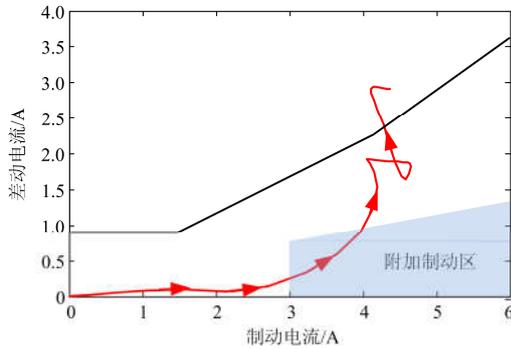


图 22 通过引入附加制动区识别互感器饱和(案例二)

Fig. 22 Method for CT saturation detection based on the add-on stabilization (CASE 2)

在发生内部故障期间，由于差动电流和制动电流同步增加，故差动电流与制动电流出现的时间差为零，差动/制动电流的动作轨迹将直接快速进入动作区，而不再先穿越附加制动区。因此，基于时差法和附加制动区的互感器饱和识别判据法在发生内部故障期间不易发生误判，能够兼顾差动保护对于内部故障的灵敏度以及在区外故障期间的可靠性。

5 关于互感器选型的讨论

目前，由于采购成本和运行历史等原因，电网中仍大量采用 P 类互感器作为保护用互感器。理论上，P 类互感器的准确限值由对称稳态电流决定，其暂态性能并无硬性规定。但是，为了提高 P 类互感器在故障暂态过程期间的性能，规程《电流互感器及电压互感器选择及计算导则》^[15]指出：220 kV 及以下降压变压器保护用电流互感器宜按在变压器低压侧区外故障时误差不超过规定值进行选取，给定暂态系数不宜低于 2。文献^[16]提到，规定 P 类互感器的给定暂态系数不小于 2 的主要依据是：实验表明即使在含有 80%剩磁的情况下，当 P 类互感器暂态系数为 2 时，能够保证互感器在故障发生后至少 3 ms 内不会进入饱和状态。这有利于实现基于时差法的互感器饱和识别。目前，时差法是母差保护中普遍采用的互感器识别判据，其根据就是该 3 ms 的互感器不饱和时间。

但是，在故障发生一段时间后，P 类互感器仍有可能逐步进入饱和状态，对有关保护造成不利影响。若需要互感器在故障暂态全过程期间的性能也满足保护的要求，则应采用 TP 类互感器。TP 类互感器能满足传变含非周期分量短路电流的暂态性能要求。但是，TP 类互感器需要通过增加铁芯截面积以防止其在暂态过程期间发生饱和。一般情况下，

其暂态面积系数 K_{td} 高达 10~30。这意味着 TP 类互感器在满足对称稳态短路电流传变要求的基础上，需要将铁芯的截面积再增大 10~30 倍，以满足其暂态性能。这无疑将大大增加互感器的制造成本以及安装难度。如何兼顾测量性能和设备成本是互感器选型需要统筹考虑的重点问题。

此外，现场也有采用 PR 类互感器以改善 P 类互感器的暂态性能的案例。PR 类互感器在 P 类互感器性能要求的基础上对剩磁系数作了限定，通过在铁芯开气隙的方法以减小剩磁，从而提高互感器在重合闸等多重故障期间的暂态性能。但是，在相同截面积的情况下，铁芯开气隙并不能增大互感器的饱和磁通，难以从根本上改善互感器的抗饱和能力。

6 总结

本文从理论解析、数字仿真以及现场录波数据分析等层面出发，围绕现场多次出现的区外故障期间变压器差动保护误动案例展开深入研究。研究结果表明，在发生短路故障期间，P 级互感器由于一次电流中含有衰减非周期分量而发生暂态饱和，差动保护缺少针对互感饱和的识别判据，这两方面因素共同作用导致了差动保护误动作的发生。数字仿真及实验检测表明，基于二次电流谐波含量、时差法以及附加制动区法等原理的互感器饱和识别判据可以有效提高差动保护在该情况下的可靠性。

电流互感器是继电保护装置获取电网信息的关键环节，其传变特性将直接影响保护的動作性能。随着中国电网逐渐发展成为交直流混联大电网，系统短路容量逐渐增加和电磁暂态过程日趋复杂，如何兼顾成本以及性能进行科学合理的互感器选型，是电力建设需要考虑的重点问题。目前，超高压系统中仍有大量暂态性能较弱的 P 类互感器在运行，如何提升继电保护在互感器饱和期间的可靠性，是保护工作者亟需解决的现场难题。本文介绍了针对互感器暂态饱和的分析方法与改进策略，并探讨了互感器选型所需要考虑的多种因素，希望能为相关的专家学者们提供参考与借鉴。

参考文献

- [1] 徐晓春, 刘革明, 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): 189-193, 215.
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): 189-193, 215.

- [2] 戚宣威, 尹项根, 张哲, 等. 变压器空投导致相邻元件差动保护误动分析及防范措施[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(3): 129-134.
QI Xuanwei, YIN Xianggen, ZHANG Zhe, et al. The study on the mal-operation reason for the current differential protection due to the adjacent transformer switching-on and its countermeasure[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(3): 129-134.
- [3] 张健康, 粟小华, 李怀强, 等. 大容量 SVC 对变压器差动保护的影响及解决措施[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(7): 164-168.
ZHANG Jiankang, SU Xiaohua, LI Huaiqiang, et al. Impact of large-capacity SVC on transformer differential protection and the solutions[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(7): 164-168.
- [4] 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.
- [5] 王奕, 戚宣威, 罗航, 等. 复杂和应涌流及其对电流差动保护的影响[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(6): 98-105.
WANG Yi, QI Xuanwei, LUO Hang, et al. Complex sympathetic inrush and its influence on current differential protection[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(6): 98-105.
- [6] 石鑫, 朱永利, 萨初日拉, 等. 基于深度信念网络的电力变压器故障分类建模[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(1): 71-76.
SHI Xin, ZHU Yongli, SA Churila, et al. Power transformer fault classifying model based on deep belief network[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(1): 71-76.
- [7] 傅伟, 赵莉华, 梁勇, 等. 多台变压器空载合闸励磁涌流及其抑制方案的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(1): 28-33.
FU Wei, ZHAO Lihua, LIANG Yong, et al. Study on no-load closing inrush current of transformer group and suppression measures[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(1): 28-33.
- [8] 邵文权, 乔妮, 王建波. 基于波形互相关系数的变压器励磁涌流识别方法[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(23): 14-20.
SHAO Wenquan, QIAO Ni, WANG Jianbo. A novel algorithm of identifying inrush current based on waveform cross-correlation coefficient[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(23): 14-20.
- [9] 兰生, 张小帆. 基于多判据的变压器差动保护方法[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(23): 125-131.
LAN Sheng, ZHANG Xiaofan. A transformer differential protection method based on multi-criterion[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(23): 125-131.
- [10] 蔡云峰, 徐洋, 潘琪. 基于自定义模型的变压器纵差动保护 PSCAD 仿真[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(3): 118-122.
CAI Yunfeng, XU Yang, PAN Qi. PSCAD simulation of transformer longitudinal differential protection based on custom model[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(3): 118-122.
- [11] 孙志杰. 变压器差动保护的波形对称方法, 中国: ZL95112781.0[P]. 1998-02-11.
- [12] ANNAKAGE U D, MCLAREN P G, DIRKS E, et al. A current transformer model based on the Jiles-Atherton theory of ferromagnetic hysteresis[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2000, 15(1): 57-61.
- [13] 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.
- [14] QI Xuanwei, YIN Xianggen, ZHANG Zhe, et al. Study on the unusual misoperation of differential protection during transformer energization and its countermeasure[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2016, 31(5): 1998-2007.
- [15] 电流互感器和电压互感器选择及计算导则: DLT866—2004[S]. 北京: 中国电力出版社, 2004.
- [16] Omicron. CT analyzer application presentation[R]. 2016.

收稿日期: 2017-02-27; 修回日期: 2016-08-31

作者简介:

戚宣威(1988—), 男, 博士, 主要研究方向为电力系统继电保护; E-mail: 814512663@qq.com

李露(1995—), 女, 研究方向为电力系统继电保护; E-mail: lulu_lq@126.com

黄晓明(1969—), 男, 高级工程师, 从事电力系统继电保护和安全自动控制方面的工作。

(编辑 葛艳娜)