

DOI: 10.7667/PSPC201775

多种电流互感器暂态饱和特性及其复杂工况下动模试验研究

王晶¹, 曹文斌², 杨增力¹, 尹项根², 王友怀¹, 潘远林²

(1. 国网湖北省电力调度控制中心, 湖北 武汉 430077;

2. 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: 电流互感器暂态饱和易引发差动保护误动。现场大量投用的 P 级、PR 级和 TPY 级电流互感器因结构和材料等差异表现出不同的暂态特性。针对这 3 种类型, 选用工业实用电流互感器, 通过实验测试和数学拟合的方法获取相关参数, 得到铁芯磁通解析表达式, 与实测饱和磁通对比判断饱和状态, 获取进入饱和的时间。针对这 3 种实用电流互感器进行动模试验, 考虑了系统单次短路、重合闸于永久故障、转换型故障以及励磁涌流等复杂暂态工况, 分析了各自暂态饱和特性和特点。在理论分析和动模试验的基础上, 简要讨论了电流互感器暂态饱和的应对方法及互感器选型问题。

关键词: 电流互感器; 暂态饱和; 复杂工况; 动模试验; 差动保护

Study on multiple types of CTs transient saturation and its dynamic simulation tests in complex operating conditions

WANG Jing¹, CAO Wenbin², YANG Zengli¹, YIN Xianggen², WANG Youhuai¹, PAN Yuanlin¹

(1. State Grid Hubei Power Dispatch and Control Center, Wuhan 430077, China; 2. State Key Laboratory of Advanced Electromagnetic Engineering and Technology (Huazhong University of Science and Technology), Wuhan 430074, China)

Abstract: The current transformer (CT) transient saturation easily leads to the misoperation of differential protection. The P-class, PR-class and TPY-class CTs which are widely used on site show different transient characteristics. For these three types, industrial practical CTs are selected, experimental test and mathematical fitting are carried out to get the relevant parameters and then obtain the mathematical expression of core flux. Whether the CT is saturated or not and when the CT get into saturation can be acquired by comparing the expression with the measured saturation flux. Three types of industrial practical CTs are used to carry out dynamic simulation tests for single short circuit, reclosing in the permanent fault, conversion fault and magnetizing current. Their transient saturation characteristics are analyzed. On the basis of theoretical analysis and dynamic tests, the methods for CT transient saturation and the CT selection scheme are discussed.

This work is supported by Science & Technology Project of State Grid Hubei Electric Power Company (2017, No.1).

Key words: current transformer; transient saturation; complex operating conditions; dynamic simulation test; differential protection

0 引言

我国电网正形成空前复杂的交直流混联大电网。高比例新能源的接入、多回大容量直流线路的跨区域互联以及各种新型电力设备的投入将会增加

电网电磁暂态过程的复杂性。电流互感器是继电保护判别系统运行状态所需的重要设备, 其测量的准确性对其动作性能至关重要。多种形式的短路故障和变压器励磁涌流等复杂运行工况引起的衰减缓慢的非周期分量造成互感器不同程度地饱和, 影响二次电流的测量, 干扰保护的正确判断。近年来, 现场发生多起因电流互感器饱和造成的保护误动事故^[1-3], 严重威胁电力系统安全稳定运行。因此, 探

基金项目: 国网湖北省电力公司科技项目(鄂电司发展(2017)1号)

究电流互感器在复杂运行工况下的暂态饱和特性,对事故原因分析、保护改进以及设备选型等至关重要。

就保护用电流互感器而言,现场广泛应用的类型有P级、PR级和TPY级等。P级规定了稳态对称一次电流下复合误差的准确限值,对剩磁无限制。PR级对剩磁系数有规定限值。TPY级能满足短路电流具有非周期分量的暂态过程性能的要求,且剩磁不超过饱和磁通的10%^[4]。不同类型的电流互感器因其结构设计的差异展现出不同的暂态特性,相同外部条件下的饱和情况也不同。目前,尚无文献针对3种类型的互感器开展暂态饱和特性的对比分析研究。以往研究电流互感器暂态特性的文献中^[5-8],无论是数字仿真还是动模试验,往往只描述暂态饱和过程中二次电流波形畸变特征,无法计算铁芯实际进入饱和的时间,且一次场景较为简单,未能反映电力系统复杂的运行工况。

本文总结了电流互感器稳态饱和、暂态饱和、局部暂态饱和以及二次电流特征并得到了仿真复现。针对3种类型(P级、PR级和TPY级)电流互感器以及流过的一次电流,通过数学拟合以及实验测试的方法获取相关参数,得到铁芯磁通解析表达式。与实测饱和磁通对比可判断饱和状态并获取进入饱和的时间。选用这些电流互感器物理模型开展了一次系统单次短路、重合闸于永久故障、转换型故障以及励磁涌流等复杂暂态工况下的动模试验,分析比较了各自的暂态饱和特性。在理论分析和动模试验的基础上,讨论了电流互感器暂态饱和的应对方法及互感器选型问题。

1 电流互感器暂态饱和和机理分析

为了判断电流互感器饱和状态及饱和时间,下面开展暂态计算并对电流互感器饱和类型及过程进行分析。电流互感器等值电路如图1。

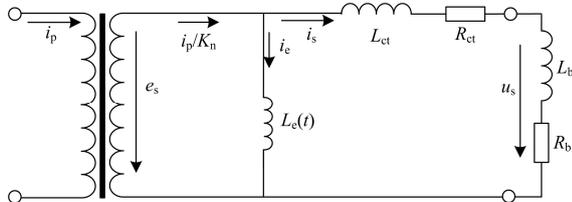


图1 电流互感器等值电路图

Fig. 1 Equivalent diagram of the CT circuit

1.1 电流互感器暂态特性计算

分析电流互感器暂态特性需要得到准确的一次电流的数学解析式。受短路类型、运行工况等影

响,实际电流很难解析表达。因此假设短路电流为工频分量与衰减非周期分量的叠加,如式(1)所示。

$$i_p(t) = \sqrt{2}I_{psc} \left[e^{-t/T_p} \cos \theta - \cos(\omega t + \theta) \right] \quad (1)$$

式中: I_{psc} 为一次电流工频量幅值; T_p 为一次电流时间常数; θ 是短路初始电流与电压的夹角,可根据未饱和时的二次电流拟合得到(假定未饱和时变比归算后互感器二次电流近似等于一次电流)。

电流互感器的暂态特性不仅与饱和程度有关,还取决于铁芯的磁滞回线特性,解析计算十分复杂。为简化计算,假设互感器铁芯为线性电感。这种假设在互感器铁芯未饱和前是合理的。经过计算和简化(忽略二次回路电感),得到励磁电流 i_c 近似为^[4]

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

式中, $T_s = L_c/R_s$ 为电流互感器二次回路的时间常数,其中 $R_s = R_{ct} + R_b$ 为二次回路电阻, R_{ct} 和 R_b 分别为二次绕组电阻和负载电阻。

电流互感器磁通解析表达式为

$$\Phi = \frac{L_c i_c}{N_s} = \frac{\sqrt{2}I_{psc} L_c}{K_n N_s} \left[\frac{T_p}{T_p - T_s} \left(e^{-\frac{t}{T_p}} - e^{-\frac{t}{T_s}} \right) \cos \theta + \frac{\sin \theta e^{-\frac{t}{T_s}}}{\omega T_s} - \frac{\sin(\omega t + \theta)}{\omega T_s} \right] \quad (3)$$

具体针对某电流互感器以及流过的某一次故障电流,可以通过式(3)考核其暂态饱和特性。根据该互感器的基本参数以及一次电流参数获得式(3)的解析表达式,做出 $\Phi-t$ 曲线,与饱和磁通对比便可判断互感器是否进入饱和以及得到进入饱和的时间 t_s 。饱和磁通 Φ_s 可由式(4)求取。

$$\Phi_s = \frac{\sqrt{2}U_s}{2\pi f \times N_s} \quad (4)$$

式中, U_s 为实验测得的饱和励磁电压。

如图2所示,图中蓝实线为通过前述方法做出

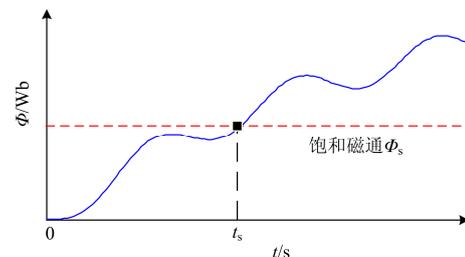


图2 铁芯磁通随时间变化曲线

Fig. 2 Curve of core flux vs. time

的某电流互感器的 $\Phi-t$ 曲线, 红虚线为算得的饱和磁通值 Φ_s 。若两者无交点, 则说明该电流互感器未饱和; 若两者有交点, 则说明该电流互感器进入饱和, 交点对应的时间为进入饱和的时间。为保护改进和互感器选型提供依据。

1.2 电流互感器饱和类型分析

根据一次电流非周期分量和工频量的大小, 饱和类型分为稳态饱和^[6]、暂态饱和^[9]和局部暂态饱和^[10]。在 PSCAD 上搭建电流互感器传变一次电流的仿真系统, 采用基于 Jiles-Atherton 理论的电流互感器仿真模型^[11], 参数可通过参数拟合的方法获

得^[12]。通过调节一次电流的工频分量及非周期分量的含量, 模拟各类故障及扰动下的一次电流, 电流互感器进入不同饱和状态。不同类型饱和状态的磁滞回线和一次、二次电流及磁滞回线如图 3 所示。

稳态饱和时, 出现对称的大圈磁滞回线, 每半周波进出一次饱和区, 二次电流正负半周都有缺损, 且正负半周波形对称; 暂态饱和时, 磁滞回环偏向一侧, 每周波进出一次饱和区; 二次电流在半个周波有缺损, 正负半周波形不对称; 局部暂态饱和时, 出现局部磁滞回环, 未在饱和区与非饱和区剧烈转换, 二次电流未发生明显缺损, 正负半周波形对称。

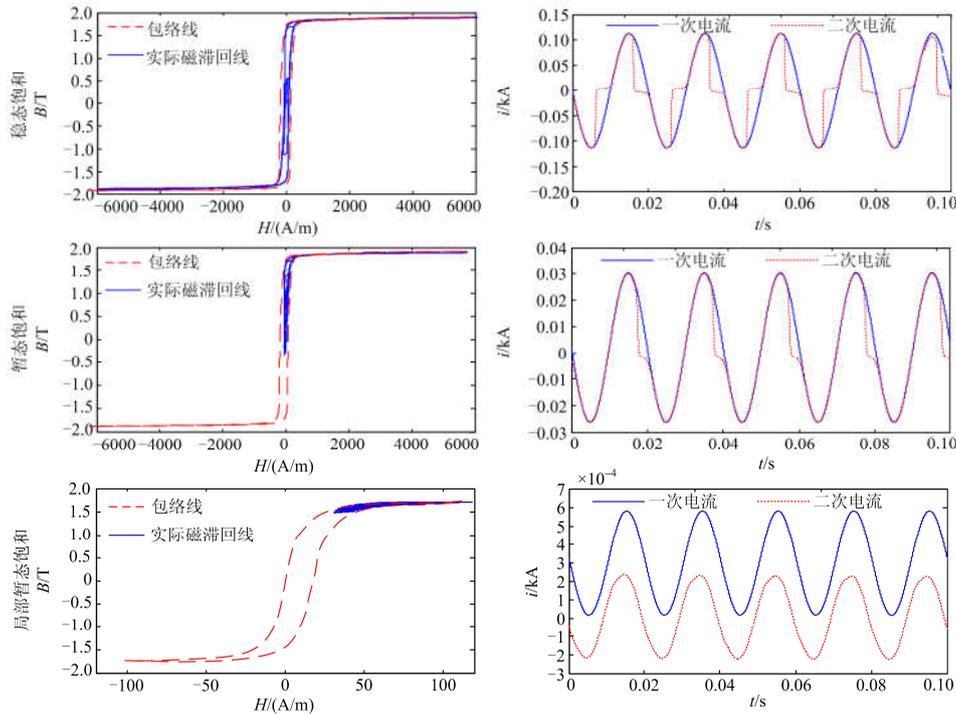


图 3 不同类型饱和状态的磁滞回线及一二次电流

Fig. 3 Hysteresis loop, the primary and the secondary current of different saturation states

2 不同类型电流互感器饱和性能测试

为了研究不同类型互感器在复杂工况下的暂态饱和特性, 开展模拟现场复杂工况的动模试验。首先对 3 种类型互感器进行基本性能测试。对试验用互感器物理模型的基本参数以及励磁特性曲线进行测试, 结果分别如表 1 和图 4 所示。

为指导事故后保护改进以及互感器选型, 采用某故障一次暂态电流, 在互感器变比、负载相同的情况下, 考察 3 种互感器暂态性能的差异。一次电流波形如图 5 所示。根据式(3), 为了得到互感器的磁通表达式, 需要知道一次电流的稳态分量幅值 I_{psc} 、一次时间常数 T_p 以及短路时电流与电压的夹

角 θ 。因此, 采用工频分量与衰减非周期分量对该电流进行拟合, 拟合结果如图 5 和式(5)所示。

表 1 电流互感器基本参数测试结果

Table 1 Basic parameters test results of different CTs

参数	互感器试验结果		
	P 级	TPY 级	PR 级
二次电阻 R_{c2}/Ω	8.053	4.9289	7.9376
饱和电压 U_s/V	649.91	3157.66	712.213
不饱和电感 L_s/H	156.82	10.2728	6.60
变比 K_n	2500:1	2500:1	2500:1
二次匝数 N_s	2500	2500	2500
拐点电流/A	0.015 909	1.003 174	0.351 15
剩磁系数	0.8624	0.0041	0.00
准确限值系数	63.5015	14.17	64.10

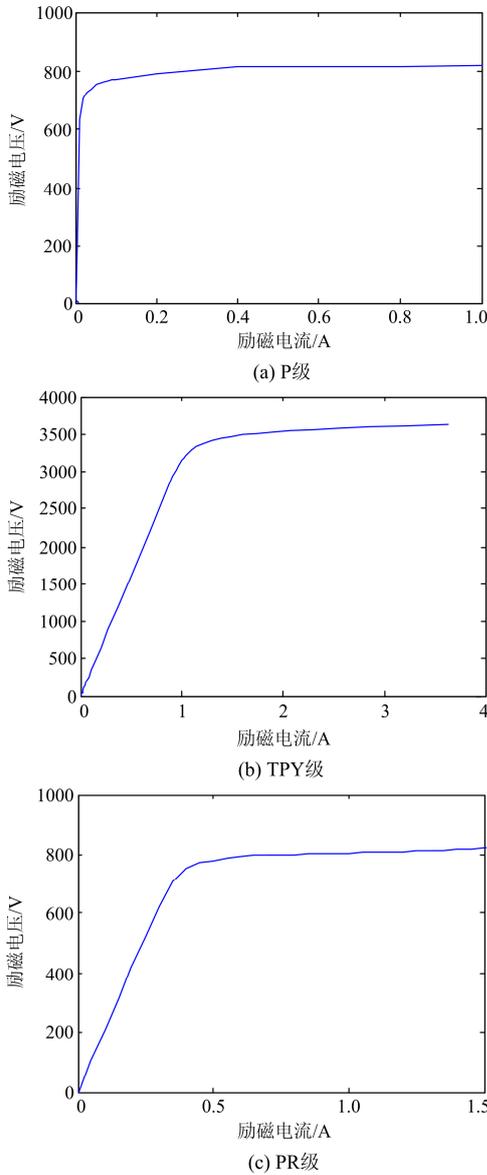


图 4 不同电流互感器励磁特性曲线测试结果
Fig. 4 Exciting characteristic curves of different CTs

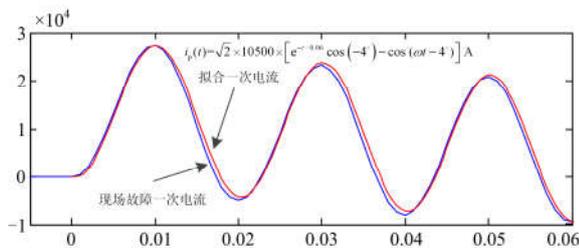


图 5 一次电流拟合对比
Fig. 5 Comparison curve of the fitted primary current

$$i_p(t) = \sqrt{2} I_{psc} \left[e^{-t/T_p} \cos \theta - \cos(\omega t + \theta) \right] = \sqrt{2} \times 10500 \times \left[e^{-t/0.06} \cos(-4^\circ) - \cos(\omega t - 4^\circ) \right] \text{ A} \quad (5)$$

式中: $I_{psc}=10\ 500\ \text{A}$; $T_p=0.06\ \text{s}$; $\theta=-4^\circ$ 。求出每种互感器的二次时间常数, $T_s=L_e/(R_{ct}+R_b)$ 。3 种互感器的二次负载均为 $18\ \Omega$ 。其余参数见表 1。由此得到 3 种电流互感器的磁通表达式分别为

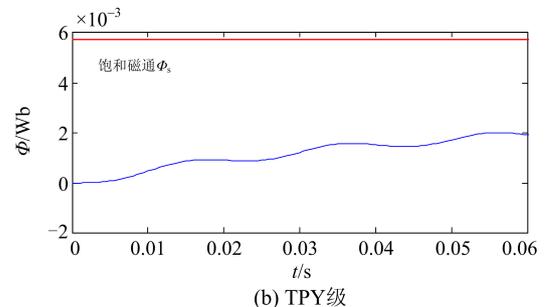
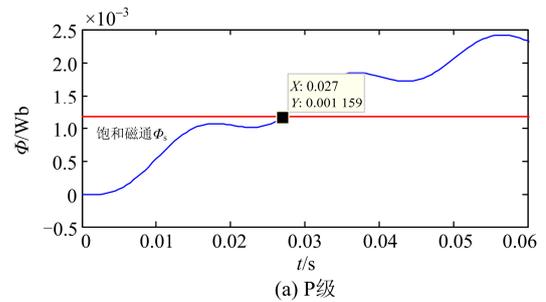
$$\Phi_1 = 0.3726 \times \left[-0.0100 \times e^{-\frac{t}{0.06}} + 0.000037 \times e^{-\frac{t}{6.0193}} - 0.00053 \sin(100\pi \times t - 4^\circ) \right] \text{ Wb} \quad (6)$$

$$\Phi_2 = 0.0244 \times \left[-0.1543 \times e^{-\frac{t}{0.06}} + 0.000496 \times e^{-\frac{t}{0.448}} - 0.0071 \sin(100\pi \times t - 4^\circ) \right] \text{ Wb} \quad (7)$$

$$\Phi_3 = 0.0157 \times \left[-0.3078 \times e^{-\frac{t}{0.06}} + 0.000873 \times e^{-\frac{t}{0.2545}} - 0.0125 \sin(100\pi \times t - 4^\circ) \right] \text{ Wb} \quad (8)$$

做出磁通变化图如图 6 中蓝线所示。同类型不同额定功率下的互感器饱和磁通不同, 功率越大, 饱和磁通越大。这里根据选用的 3 种典型互感器, 测得其饱和电压见表 1, 根据式(4)计算出各自的饱和磁通(P 级: $0.001\ 16\ \text{Wb}$, TPY 级: $0.005\ 69\ \text{Wb}$, PR 级: $0.001\ 29\ \text{Wb}$), 在图 6 中用红直线标出。

可以发现: P 级互感器进入饱和, 时间为 $0.027\ \text{s}$; TPY 级互感器未进入饱和; PR 级互感器进入饱和, 时间为 $0.030\ \text{s}$ 。说明 TPY 级互感器有良好的暂态性能, 较难饱和。因为 PR 级互感器对剩磁有限制, 其进入饱和的时间晚于 P 级互感器。



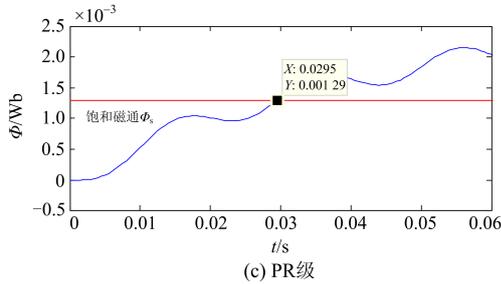


图 6 磁通变化曲线

Fig. 6 Exciting characteristic curves of different CTs

3 复杂暂态工况下动模试验

前文通过理论分析，分析了不同类型互感器暂态饱和差异。实际上，剩磁也是影响互感器饱和特性的关键因素，计算饱和时间需要考虑剩磁的影响。互感器剩磁对饱和影响的理论分析值得进一步开展研究，本章仅通过动模试验定性研究。在华中科技大学动模实验室开展试验，模拟一次系统单次短路、重合闸于永久故障、转换型故障以及励磁涌流等复杂暂态工况，以研究 3 种类型电流互感器的暂态饱和特性及表现行为。

3.1 单次短路过程期间的暂态饱和

P 级和 TPY 级电流互感器位于 54QF，二次负载都为 50 Ω，电源出口带短线 67XL 防止短路电流过大，在 54QF 处发生短路故障，如图 7 所示。试验所得的一、二次电流如图 8 所示，观察波形可见，P 级互感器发生暂态饱和，而 TPY 级互感器尚未进入饱和状态。将 P 级和 TPY 级电流互感器的二次负载增加至 150 Ω，试验结果如图 9 所示，此时 TPY 级互感器仅在第一个周波内进入了暂态饱和状态，而 P 级互感器发生了稳态饱和。

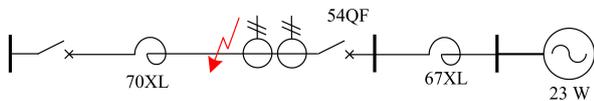


图 7 互感器暂态饱和短路试验一次系统接线图

Fig. 7 Diagram of CT transient saturation short-circuit fault

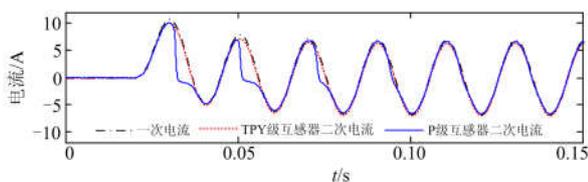


图 8 二次负载为 50 Ω 时互感器一次、二次电流

Fig. 8 Primary and secondary current when the secondary load is 50 Ω

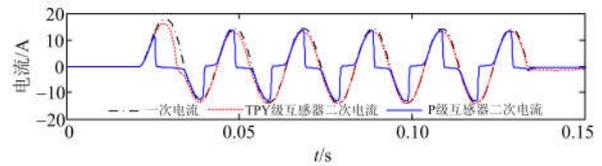


图 9 二次负载为 150 Ω 时互感器一次、二次电流

Fig. 9 Primary and secondary current when the secondary load is 150 Ω

试验表明，二次负载越大电流互感器越容易饱和。比较 P 级和 TPY 级电流互感器，因为 TPY 级电流互感器考虑了短路电流具有非周期分量的暂态过程的影响，规定剩磁不超过饱和磁通的 10%，具有良好的暂态性能，不容易饱和。

3.2 重合于永久故障期间的暂态饱和

在 0 km 长线路两侧分别放置 P 级和 PR 级电流互感器，互感器二次负载均为 60 Ω，在线路 53QF 外部出口处发生永久性故障，模拟线路的重合闸过程，如图 10 所示，试验结果如图 11 所示(试验条件均未使 TPY 级互感器饱和，二次电流与一次电流完全重合，故未画出)。刚短路时，P 级和 PR 级互感器均发生暂态饱和。第一次重合闸时，受剩磁的影响，P 级互感器重合闸后的饱和程度较深，而 PR 级电流互感器剩磁系数较小，两次合闸饱和程度基本一致。

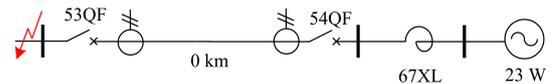


图 10 重合于永久故障试验一次系统接线图

Fig. 10 Diagram of reclosing the fault line to the permanent fault

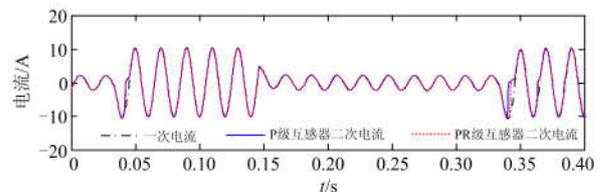


图 11 重合于永久故障试验结果

Fig. 11 Test results of reclosing the fault line to the permanent fault

3.3 区内转区外故障期间的暂态饱和

在线路 75XL 两侧分别设置 PR 级电流互感器，二次负载均为 50 Ω，在线路内部和外部先后发生故障，以模拟区内转区外故障，如图 12 所示，试验结果如图 13 所示(试验条件均未使 TPY 级互感器饱和，二次电流与一次电流完全重合，故未画出)。



图 12 区内转区外故障试验一次系统接线图

Fig. 12 Diagram of a short circuit fault transferring from the internal zone to the external zone

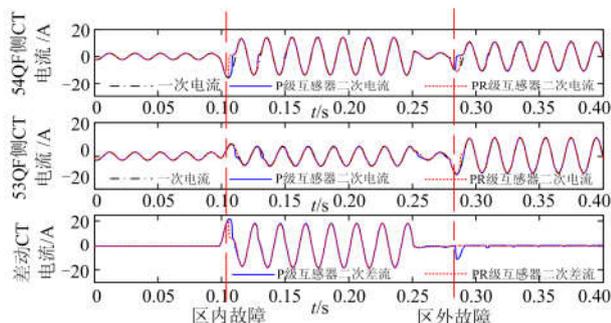


图 13 电流互感器区内转区外故障试验结果

Fig. 13 Test results of a short circuit fault transferring from the internal zone to the external zone

通过分析可见, 对于 QF54 侧互感器: 当发生区内故障时, PR 级互感器暂态饱和比 P 级互感器更严重, 这是因为区内故障时两者均有反向剩磁, 而因为 PR 级互感器剩磁系数小, “抵消”作用不如 P 级互感器, 故第一个周波内饱和更严重, 随后的周波因为无剩磁影响, PR 级互感器比 P 级饱和程度差不多; 当发生区外故障时, P 级互感器暂态饱和比 PR 级互感器更严重。

对于 QF53 侧互感器, 当发生区内故障时, P 级互感器比 PR 级互感器暂态饱和更严重, 而区外故障时, PR 级互感器比 P 级互感器暂态饱和更严重, 同样是因为存在反向剩磁, P 级互感器的“抵消”作用强于 PR 级电流互感器。

区外故障时, 由于剩磁的影响, 54QF 侧 P 级电流互感器饱和程度比 53QF 侧更严重, 造成较大差流, 易引发差动保护误动; 而两侧 PR 级电流互感器由于剩磁影响较小, 饱和程度区别不大, 差流几乎为零, 差动保护不会误动。

3.4 穿越性励磁涌流造成的暂态饱和

在线路的一侧连接变压器, 空投时线路流过穿越性的励磁涌流, 如图 14 所示。在线路两侧分别安装 P 级电流互感器, 53QF 侧互感器负载大小为 $20\ \Omega$, 54QF 侧负载大小为 $0\ \Omega$ 。试验结果如图 15 所示, 分析可见, 在涌流初期, 线路两侧互感器均未饱和, 差流较小; 在经过约 7 个周波以后, 由于励磁涌流非周期分量的作用, 53QF 侧的互感器发生了暂态饱和, 此时线路的差流开始增加。线路两侧电

流互感器饱和特性不一致, 一侧率先发生暂态饱和, 引起较大差流, 可能会造成差动保护误动。

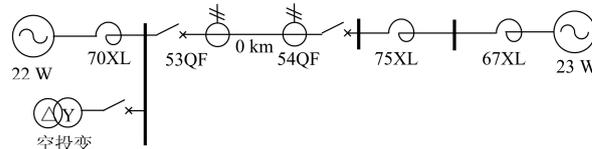


图 14 线路流过穿越性励磁涌流一次系统接线图

Fig. 14 Diagram of the flowing through inrush current

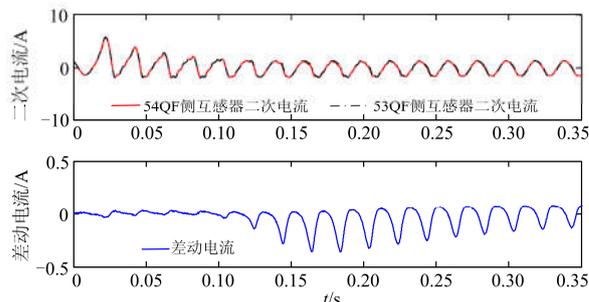


图 15 线路流过穿越性励磁涌流试验结果

Fig. 15 Test results of the CT transient saturation for the flowing through inrush current

4 电流互感器暂态饱和应对方法讨论

影响电流互感器饱和的因素很多, 包括一次系统短路容量、运行工况(影响剩磁)和二次回路阻抗等, 不同类型的电流互感器也因材料特性和结构设计等方面的差异表现出不同的饱和特性。对于电流互感器饱和造成的保护误动问题, 目前主要有两方面的应对策略: 一是改进电流互感器暂态性能或合理选择其类型, 二是改进算法识别二次电流的饱和特征, 并采取相应措施避免差动保护误动。

对于大量使用的 P 级互感器, 只规定了稳态对称一次电流下复合误差的准确限值, 对其暂态性能并无要求, 若一次电流含有较大非周期分量或存在较大剩磁, 互感器将快速饱和。为了使互感器的暂态性能都能满足保护的要求, 宜采用 TP 类互感器。TP 类互感器增加铁芯截面积提高暂态面积系数 K_{td} , 以防止其暂态饱和。但是满足 C-O 和 C-O-C-O 工作循环要求的额定暂态面积系数往往是满足对称稳态短路电流传变要求的数十倍, 铁芯面积也成倍增加, 增大了设备成本。另外, PR 级互感器对剩磁系数作了限定, 现场运行和试验表明其在重合闸和转换性故障等容易产生剩磁的多重故障期间的暂态性能相对于 P 级互感器有了较大改善, 但其饱和磁通并未提高, 当一次电流含有较大非周期分量时仍易饱和。

互感器饱和识别方法(如时差法^[13]、附加制动

区法^[14]、谐波制动法^[15]、动态虚拟磁通法^[16]和波形对称法^[17])以及利用互感器线性传变阶段测得的二次电流实现保护决策的方法(如采样值差动^[18]和小矢量算法^[19]等)都有不错的效果。一定条件下,保护可以采取多种措施减缓暂态饱和的影响,而无需互感器本身提出特殊要求,减少投资成本。但鉴于各种应对饱和的保护算法仍有各自局限性以及电网和设备的复杂性,互感器的选型还要考虑多方面的因素。对于 500 kV 系统以及发电机,时间常数较大,需要确保互感器的暂态性能满足保护的应用需求,采用 TPY 级互感器;输电线路等差动保护一般采用带气隙的 TPY 级互感器并按照考虑重合闸的二次工作循环校核其暂态特性;在空间有限、难以安装 TPY 级互感器的情况下,采用带小气隙的 PR 级互感器。220 kV 系统及以下系统的暂态问题及其影响后果比 500 kV 系统相对较轻,一般按稳态特性选择 P 类、PR 类互感器。

5 结论

为了事故分析需要,本文从数学解析和动模试验等层面,围绕多种类型电流互感器暂态饱和特性展开深入分析。主要工作和结论如下。

1) 针对 P 级、PR 级和 TPY 级电流互感器以及流过的一次故障电流,通过数学拟合以及实验测试的方法获得参数,得到未饱和时铁芯磁通解析表达式。与实测饱和磁通对比发现 TPY 级互感器未饱和, P 级、PR 级互感器饱和,且 PR 级互感器进入饱和的时间晚于 P 级互感器。

2) 针对 3 种互感器开展复杂暂态工况下动模试验研究。试验表明 TPY 级互感器暂态面积系数大,不容易饱和。PR 级互感器剩磁系数较小,相同条件下受剩磁的影响较 P 级互感器小,但 P 级互感器在有较大反向剩磁情况下暂态性能优于 PR 级互感器。重合闸、励磁涌流情况下两侧互感器饱和特性不一致易引发差流,差动保护面临误动风险。

3) 探讨了应对电流互感器暂态饱和的两类方法。增加投资以提高设备本身的抗饱和能力和保护识别算法避免保护误动。

参考文献

[1] 刘志仁,殷志. 电流互感器饱和导致保护拒动事故的分析[J]. 江苏电机工程, 2016, 35(4): 84-86.
LIU Zhiren, YIN Zhi. Analysis of protective action resistance accidents caused by current transformer saturation[J]. Jiangsu Electrical Engineering, 2016, 35(4): 84-86.

[2] 邓茂军,许云龙,张童,等. 变压器区外故障 CT 饱和和对主变保护的影响分析[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(4): 129-133.
DENG Maojun, XU Yunlong, ZHANG Tong, et al. Analysis on outside transformer fault causing CT saturation and its influence on transformer protection[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(4): 129-133.

[3] 尹项根,张哲,王友怀,等. 变压器间及其与电流互感器暂态交互作用分析和保护对策[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(23): 1-9.
YIN Xianggen, ZHANG Zhe, WANG Youhuai, et al. Transient interaction analysis and protection countermeasures between transformers and their current transformers[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(23): 1-9.

[4] 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.
Current transformer and voltage transformer selection and calculation guide: DLT866—2004[S]. Beijing: China Electric Power Press, 2004.

[5] 陈德树,尹项根,张哲,等. 电磁式电流互感器暂态特性试验研究[J]. 电力系统保护与控制, 2008, 36(13): 1-4, 32.
CHEN Deshu, YIN Xianggen, ZHANG Zhe, et al. Test study on the transient performance of the electro-magnetic type current transformer[J]. Power System Protection and Control, 2008, 36(13): 1-4, 32.

[6] 黄鸣宇. 电流互感器稳态及暂态饱和特性的分析研究[J]. 宁夏电力, 2009(5): 1-4.
HUANG Mingyu. Analysis and research on steady and transient saturation characteristics of CT[J]. Ningxia Electric Power, 2009(5): 1-4.

[7] 景敏慧,孔霄迪,覃松涛,等. P 类电流互感器饱和原因分析及对策[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(21): 94-97, 109.
JING Minhui, KONG Xiaodi, QIN Songtao, et al. Cause analysis on the saturation of P class current transformers and its countermeasures[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(21): 94-97, 109.

[8] 白加林,高昌培,王宇恩,等. 基于频数分布的防止变压器差动保护误动的新方法[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(8): 14-21.
BAI Jialin, GAO Changpei, WANG Yuen, et al. A new algorithm based on frequency distribution for avoiding the mal-operation of transformer differential protection[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(8): 14-21.

- [9] 袁季修, 盛和乐. 电流互感器的暂态饱和及应用计算[J]. 继电器, 2002, 30(2): 1-5.
YUAN Jixiu, SHENG Hele. The transient saturation of current transformer and its application calculation[J]. Relay, 2002, 30(2): 1-5.
- [10] 袁宇波, 陆于平, 许扬, 等. 切除外部故障时电流互感器局部暂态饱和对变压器差动保护的影响及对策[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(10): 12-17.
YUAN Yubo, LU Yuping, XU Yang, et al. The influence and countermeasure to transformer differential protection of CT partial transient saturation caused by external fault removal[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(10): 12-17.
- [11] 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.
- [12] YIN Xianggen, ZHANG Zhe, QI Xuanwei, et al. Modeling and analysis for practical CT based on transient test and parameter identification[J]. CSEE Journal of Power and Energy Systems, 2016, 2(4): 51-57.
- [13] 李岩, 陈德树, 张哲, 等. 鉴别 TA 饱和的改进时差法研究[J]. 继电器, 2001, 29(11): 1-4.
LI Yan, CHEN Deshu, ZHANG Zhe, et al. Research of the improved time difference method to distinguish TA saturation[J]. Relay, 2001, 29(11): 1-4.
- [14] 刘玉东, 王增平, 张志梅. 变压器差动保护中电流互感器饱和的综合判据[J]. 电网技术, 2007, 31(18): 87-90.
LIU Yudong, WANG Zengping, ZHANG Zhimei. Study on comprehensive TA saturation criterion for transformer differential protection[J]. Power System Technology, 2007, 31(18): 87-90.
- [15] 李丽, 都洪基, 刘林兴, 等. 计算谐波比确定母线保护中电流互感器的饱和[J]. 电力自动化设备, 2003, 23(7): 69-72.
LI Li, DU Hongji, LIU Linxing, et al. Research on confirming CT's saturation in busbar protection by calculating harmonic ratio[J]. Electric Power Automation Equipment, 2003, 23(7): 69-72.
- [16] 董新涛, 康小宁, 步梦琼, 等. 基于动态虚拟磁通分析的 CT 饱和和识别方案研究[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(7): 126-130.
DONG Xintao, KANG Xiaoning, BU Mengqiong, et al. Research on CT saturation recognition scheme based on dynamic virtual flux analysis[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(7): 126-130.
- [17] 林湘宁, 刘世明, 杨春明, 等. 几种波形对称法变压器差动保护原理的比较研究[J]. 电工技术学报, 2001, 16(4): 44-49, 70.
LIN Xiangning, LIU Shiming, YANG Chunming, et al. Study on comparisons among some waveform symmetry principle based transformer differential protection[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2001, 16(4): 44-49, 70.
- [18] 李晓华, 尹项根, 陈德树. 三相同时刻采样值电流差动保护[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(31): 64-70.
LI Xiaohua, YIN Xianggen, CHEN Deshu. Novel differential protection based on three phase simultaneity sampling values[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(31): 64-70.
- [19] 邓祥力, 王传启, 张哲, 等. 基于小矢量技术的快速差动电流速断保护[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(14): 67-71.
DENG Xiangli, WANG Chuanqi, ZHANG Zhe, et al. Fast differential current instantaneous trip protection based on phaselet algorithm[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(14): 67-71.

收稿日期: 2017-03-20

作者简介:

王晶(1986—), 女, 工程师, 研究方向为继电保护运行管理;

曹文斌(1992—), 男, 通信作者, 博士研究生, 研究方向为电力系统继电保护; E-mail: 1019097704@qq.com

杨增力(1982—), 男, 高级工程师, 研究方向为继电保护运行管理。

(编辑 周金梅)