

电流互感器暂态饱和特性的实证分析

段建东¹, 雷 阳^{1,2}, 金转婷¹, 张小庆³, 张宜阳³, 李云阁³

(1. 西安理工大学 电气工程系, 陕西 西安 710048; 2. 西安热工研究院有限公司, 陕西 西安 710054;

3. 国网陕西电力科学研究院, 陕西 西安 710054)

摘要:针对电力系统中的 P 级电流互感器的暂态饱和问题, 模拟了 330 kV/110 kV 短路系统中电流互感器的工作情况。在高达 48 kA 的暂态通流下, 利用探究性试验讨论并实证分析了电流互感器的暂态饱和特性。面向暂态饱和特性的应用层面, 试验中还连接了差动继电保护装置, 讨论了继电保护误动作情况; 根据指标暂态系数, 给出了保护用 P 级电流互感器选择的判断依据。在实际电流互感器暂态特性的实证分析下, 所得结论为系统投运中的 P 级电流互感器安全稳定工作问题提供了参考基础。

关键词: P 级电流互感器; 暂态饱和; 大电流试验; 饱和特性应用

中图分类号: TM 452

文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2018.07.029

0 引言

电流互感器作为电力系统继电保护、自动控制、信号指示等方面的主要一次设备, 在系统可靠运行中占据重要地位。电流互感器的非正常运行 (即严重饱和) 可能会对电力系统的计量、保护造成错误或误动的严重后果^[1-6]。因此, 电流互感器的饱和问题, 特别是电流互感器暂态饱和一直受到继电保护、系统运行工作者的关注。

针对电流互感器暂态饱和定量的实证性研究一直是一项非常基础但成本高昂的工作。目前的研究更倾向于针对电流互感器暂态饱和发生后的应对方案, 如饱和的识别监测、饱和补偿或优化保护判据等^[7-12]。然而这一系列的研究依赖于对电流互感器实际运行状态, 即电流互感器饱和模型的准确把握, 才能有效且可靠地投运到挂网电流互感器中。直观大电流下电流互感器的暂态饱和与再饱和过程, 对大电流模型的准确建立具有十分重要的影响。此外, 对不同电流互感器的类型、变比及实际二次回路等参数对饱和和波形的传变作用的再分析, 也可保护用电流互感器的选择依据提供重要

的指导参考。

目前, 因电力标准实施、成本因素、历史安装等原因, P 级电流互感器在 110 kV/330 kV 电网投运数量居多。本文在理论分析电流互感器暂态传变特性的基础上, 研究并设计了 P 级电流互感器可高达 48 kA (周期分量有效值) 的大电流通流试验, 实证分析了电流互感器暂态饱和的过程及电流互感器参数的传变影响。最后, 面向继电保护应用, 对试验中的变压器差动保护的误动作以及饱和特性问题进一步进行分析, 以期给出相应的应对措施。

1 电流互感器暂态传变特性的理论分析

保护用 P 级电流互感器的接线如图 1 所示, 其由一次侧母线、铁芯、二次侧绕组及负载组成, 其中, 负载即为微机保护装置, 通常为电阻性且负载较轻, 一般小于 $2 \text{ V} \cdot \text{A}$ 。

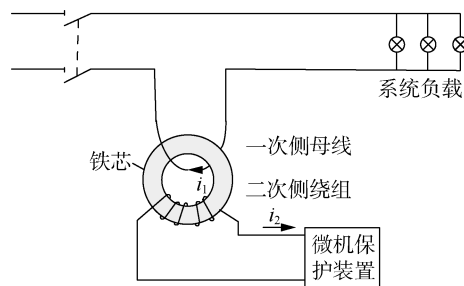


图 1 典型 P 级电流互感器的接线

Fig.1 Wiring connection of typical P-type CT

当系统发生短路故障时, 含电流互感器的系统等值电路可表示为图 2。

该典型暂态系统的等效电源可表示为 $U_p(t) = \sqrt{2} U_p \sin(\omega t + \varphi_p)$, 其中, φ_p 为短路时刻的电压相角。以系统某相发生金属性短路为例, 可推导一次侧的短路电流为:

收稿日期: 2017-05-31; 修回日期: 2018-04-12

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (50707026); 陕西省自然科学基金基础研究计划资助项目 (2014JM7255); 陕西省重点学科建设专项资金资助项目 (5X1201); 陕西省教育厅服务地方专项计划项目 (2013JC24); 强电磁工程与新技术国家重点实验室 (华中科技大学) 开放课题基金资助项目 (2018KF001)
Project supported by the National Natural Science Foundation of China (50707026), Shaanxi Province Natural Science Basic Research Program (2014JM7255), Shaanxi Key Discipline Construction Special Funds (5X1201), Local Service Industrialization Special Plan of Shaanxi Education Department (2013-JC24) and State Key Laboratory of Advanced Electromagnetic Engineering and Technology (Huazhong University of Science and Technology) (2018KF001)

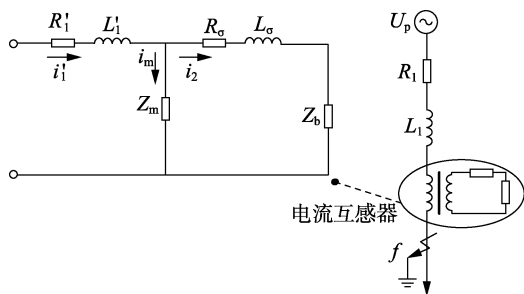


图 2 电流互感器在暂态运行中的等效电路

Fig.2 Equivalent circuit of CT in transient operation

$$i_1 = \frac{\sqrt{2} U_p}{\sqrt{R_1 + (\omega L_1)^2}} [\sin(\omega t + \varphi_p - \phi) - e^{-t/T_1} \sin(\varphi_p - \phi)] \quad (1)$$

其中, $\phi = \arctan(\omega L_1 / R_1)$; $T_1 = L_1 / R_1$ 为一次侧系统的时间常数。

二次侧方面有:

$$i_m = i_1 / N - i_2 \quad (2)$$

$$e_m = L_m di_m / dt = R_2 i_2 + L_2 di_2 / dt \quad (3)$$

其中, i_m 为励磁电流; N 为电流互感器变比; i_2 为二次侧负载电流; e_m 为励磁感应电动势; L_m 为等效励磁电感(其值大小在一定范围后随不同励磁电流水平而呈非线性变化); $R_2 = R_\sigma + R_b$ 为电流互感器的漏阻和负载电阻之和; $L_2 = L_\sigma + L_b$ 为电流互感器的漏感和负载电感之和。

设 $T_2 = L_2 / R_2$, 联立式(2)、(3)可推得:

$$i_m(t) = \frac{i_1(t)}{N} \left[1 + \frac{L_m}{L_2} \sqrt{T_2^{-1}} \sin(\omega t) \right] \quad (4)$$

从式(4)中可知暂态过程中, 励磁电流 i_m 的大小与短路电流水平 i_1 、二次侧负载情况(R_2 、 L_2)以及励磁电感 L_m 等紧密相关。

电流互感器的饱和问题, 即铁芯中的磁饱和问题与所选铁芯的材料、尺寸、开隙、工艺及安装形式等^[13]都有重要关系。由于剩磁和磁滞效应的存在, 式(4)中的 L_m 在故障下呈非线性变化。

综上所述, 短路情况下电流互感器的励磁电流大小及发生暂态饱和深度取决于一次侧电流水平、二次侧负载回路情况和铁芯内的剩磁这 3 个因素。

2 电流互感器暂态大通流试验

电流互感器暂态传变特性及其对继电保护的影响不仅需要在理论上进行定性分析, 更需要通过动态模拟试验的定量测试与实证分析^[14]。为此, 本文模拟电流互感器的实际运行工况, 与西安高压电器研究所、陕西电科院合作, 专门研究开展了电流互感器暂态测试的大通流试验, 试验场如图 3 所示。

图 4 为保护系统的配置图, 共设置 3 处模拟故障发生的位置以测试保护装置是否有误动作情况。

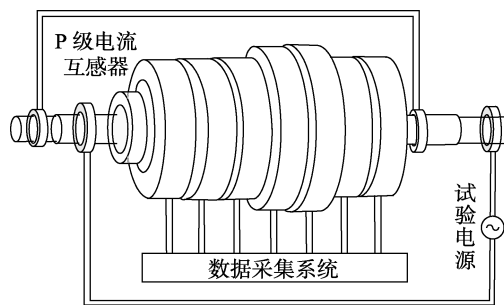


图 3 电流互感器大电流试验现场示意图

Fig.3 Field diagram of CT large current test

采用实际长度的电缆、保护和故障录波装置反映真实的负载状况; 利用数据采集系统、保护和故障录波装置对电流互感器一、二次侧电流进行多路、同步采样, 其中试验保护系统共选用 4 套, 具体如下。

- 线路差动保护 2 套, 采用 TA_3 (变比为 1 200 A/1 A) 和 TA_4 (变比为 600 A/1 A);
- 变压器差动保护 1 套, 接 TA_5 (变比为 1 200 A/1 A) 和 TA_6 (变比为 600 A/1 A);
- 母线差动保护 1 套, 接 TA_5 (变比为 1 200 A/1 A) 和 TA_6 (变比为 600 A/1 A)。

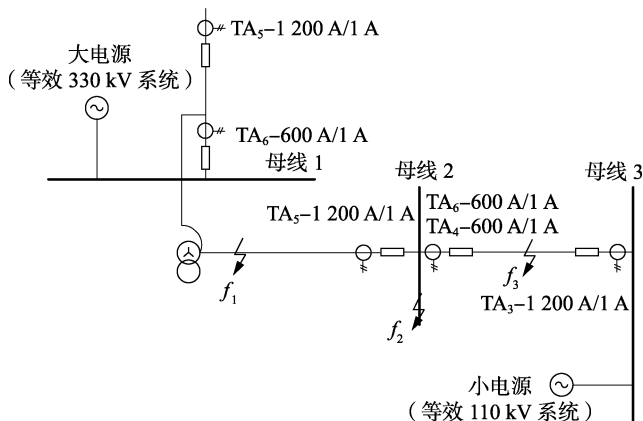


图 4 试验模拟的保护系统

Fig.4 Protection system of test simulation

本文试验对多只 P 级电流互感器线圈进行串联测试(试验系统接线图如图 5 所示), 试验通流一次完成, 多组电流互感器线圈的试验数据一次采集完

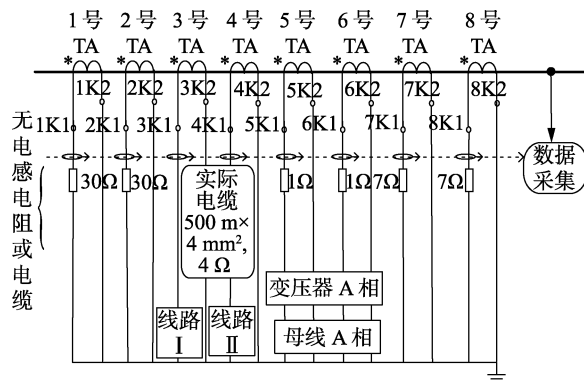


图 5 试验系统接线原理

Fig.5 Wiring principle of test system

成。所采用的 P 级电流互感器为实际变电站 330 kV/110 kV 等级下装设的试品,参数见表 1。所模拟的二次侧连接也和实际连线近似,以图 5 中 3、4 号电流互感器的连接为例,二次侧采用长度为 500 m、截面积为 4 mm^2 的聚氯乙烯线缆连接一套故障录波装置,测得二次侧负载为 4.345Ω 。其余通道选择无感类型电阻为负载,范围从额定负载大小到微机保护装置的一般值。

表 1 被试电流互感器参数

Table 1 Parameters of testing CT

变比	准确级	额定负载/ (V·A)	热稳定 电流/ [kA·(3s) ⁻¹]	动稳定 电流/ kA
1 200 A/1 A	10P20	30	63	160
600 A/1 A	5P20	30	50	125

注:kA·(3s)⁻¹表示 3 s 耐受的电流发热值。

所采用的试验系统能够发生实际工况条件下的稳态短路电流,并可叠加峰值为其 80% 左右的衰减直流分量,时间常数可调。故障发生的时刻、重合闸时刻及持续时间可调,以获得不同大小的短路电流和铁芯内的剩磁^[15-16]。

在进行试验前,还需确定试验通流的范围,以避免试验中大量出现电流互感器未饱和的无效数据。通过对所选 P 级电流互感器的内阻、拐点电压、伏安特性曲线,初步推算该电流互感器的临界饱和电流,并结合该电流互感器实际投运电网的短路容量,最后确定一次侧通流周期分量有效值为 6~48 kA。在特制的试验系统下进行了若干组通流试验,有关本试验的详细情况和试验结果有另文发表^[17]。

3 电流互感器暂态饱和影响因素的实证分析

上述电流互感器暂态大通流试验充分展示了电流互感器的暂态饱和与再饱和发生、发展的全过程,以及电流互感器暂态饱和与一次侧电流、二次侧负载、剩磁的关系,分别阐述如下。

3.1 一次侧短路电流与暂态饱和

10P20 的 P 级电流互感器在额定负载下初饱和的试验波形如图 6 所示(图中,一次侧电流折合至二次侧),对应的一次侧暂态电流依次为 6 kA、12 kA、48 kA。

图 6(a)~(c)中,电流互感器均发生了暂态饱和现象,电流互感器二次侧的畸变程度逐级加深。另一个受暂态电流水平变化的因素为饱和起止时间,从录波图形中也可直接观察得知。由于饱和情况下十分关注对系统继电保护的影响,从图 6 所示波形中可以看出电流互感器退出饱和状态的时间十分缓慢,至少需 8 个周期。在图 6 所示的短路水平下,电流互感器的饱和出现在故障发生后的 2~5 ms 内,且一次侧电流越高,越能够加速进入饱和,进入饱和时刻与一、二次侧系统的时间常数有关。所以,

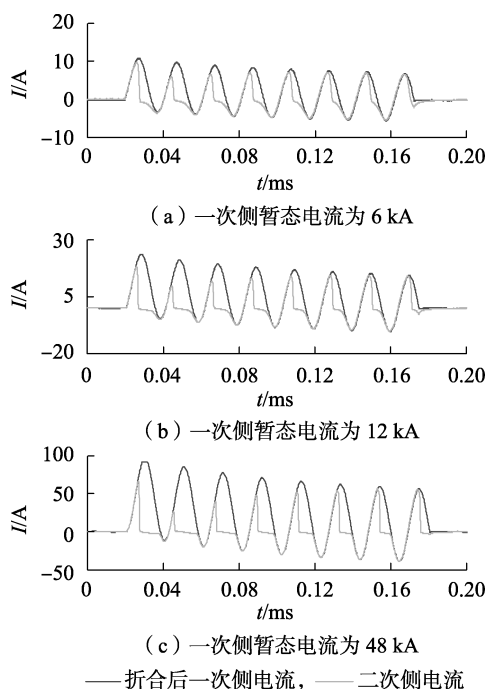


图 6 不同暂态电流水平下的录波图形

Fig.6 Recording waveforms under different transient currents

暂态电流水平与电流互感器饱和的畸变深度呈正相关性,暂态电流越大,越能够加速饱和进入时间、延迟退出时间。

借用标准中对 P 级电流互感器稳态误差的规定评判本次电流互感器的暂态传变误差:

$$\varepsilon = \frac{|I_{1\max} - I_{2\max}|}{I_{1\max}} \times 100\% \quad (5)$$

其中, $I_{1\max}$ 为暂态试验中电流互感器一次侧电流的峰值(单位为 A); $I_{2\max}$ 为暂态试验中电流互感器二次侧电流的峰值(单位为 A)。

规格为 10P20 的电流互感器稳态误差大部分能满足要求。暂态情况下,该规格的电流互感器的传变误差如图 7 所示。由图可见,规格为 10P20 的电流互感器的暂态传变误差随着一次侧暂态电流的增大而增大,当电流水平继续增加后,因 $I_{1\max}$ 的基数太大,虽然饱和越来越严重,但电流互感器传变误差的数值却随之减小。

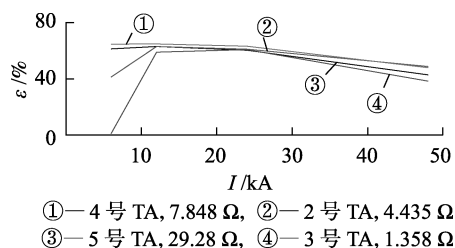


图 7 10P20 级、变比为 1 200 A/1 A 的电流互感器暂态误差曲线

Fig.7 Transient error curves of 10P20 CT with ratio of 1 200 A/1 A

3.2 二次回路负载与暂态饱和

保护用电流互感器的二次回路所连接的多为继电保护装置,等效负载是其二次侧线缆上的阻抗和保护装置的交流功耗之和。不同的保护装置对应的负载不同,且不同安装位置对应的线缆功耗不同。

由式(3)可知二次侧负载越大,要求励磁感应电动势 e_m 越大,即相同的磁场强度下磁感应强度 B 越大,则铁芯更容易发生饱和。

图 8(a)、(b)、(c)分别为 1/7 额定负载、1/4 额定负载和额定负载(其他条件相同)下的暂态电流录波。由图可见,暂态饱和的过程受负载水平的影响,对应的二次侧畸变程度随负载水平的增加而加深,但负载水平并不会改变饱和时间的起止。从试验结果可知,应当避免使电流互感器在超过其 1/4 额定负载的情况下工作。

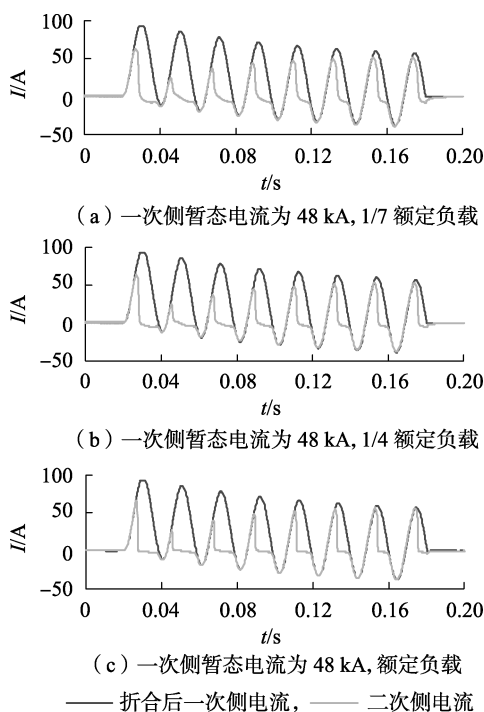


图 8 不同负载下的暂态电流录波

Fig.8 Recording waveforms of transient currents under different loads

3.3 剩磁与暂态饱和

铁磁材料中,当磁场强度 H 从最大值开始减少时,磁感应强度 B 将沿一个较高水平的路径回到 B_r ,此时 $H=0$ 且铁芯仍处于被磁化状态,含有剩余磁通,记其磁通密度为 B_r 。

在电流互感器剩磁问题中,当故障电流被切除时(如图 9 中点 C 所示),电流互感器中的磁通密度 B 开始衰减,若经相当长的时间后可以衰减至稳定值。系统重合闸后再次出现较大的故障电流时(如图 9 中点 C' 所示),电流互感器中的磁通从当前值开始再次上升且很容易上升至饱和磁通,使电流互感器因剩磁引起暂态饱和。一般而言,希望电力系

统断路器重合闸等待时间 Δt 较小,否则电流互感器铁芯中就会具有一定的剩磁水平,导致饱和更迅速、畸变程度更深。

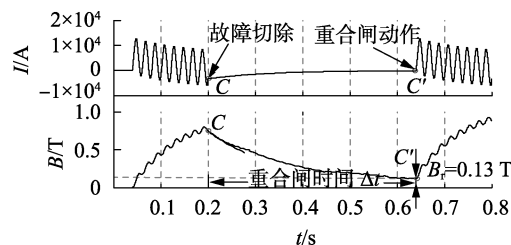


图 9 暂态磁通密度变化

Fig.9 Variation of transient magnetic flux density

剩磁水平通常以剩磁系数 K_r 表征,即剩磁磁通与饱和磁通的比值。严重饱和电流互感器的铁芯内会存有相当大的剩磁,往往导致 $K_r \geq 0.5$ 。反之,反向剩磁的抵消作用可延迟饱和时间,反向剩磁较大的情况下电流互感器甚至不发生饱和。

4 保护用 P 级电流互感器选择的实证分析

继电保护中要求电流互感器能够准确地进行线性传变,但其暂态饱和特性却给继电保护的正确动作带来隐患甚至导致继电保护误动。因此,非常有必要通过观察继电保护受电流互感器暂态饱和影响而误动的现象,实证分析其暂态饱和的发生时间与深度,定量描述暂态饱和程度,以便提出抗饱和措施或者更换电流互感器的依据。

4.1 保护装置受电流互感器饱和影响而误动

在所模拟的电流互感器大电流试验中,一次侧暂态电流为 48 kA 情况下 f_3 处发生区外故障时,变压器差动保护发生了误动,在本通流试验中的误动作率约为 5.6%(2 次误动,4 套装置 $\times$ 9 次暂态通流)。

图 10 为变压器差动保护装置接 P 级电流互感器 TA_5 (1 200 A/1 A) 和 TA_6 (600 A/1 A) 时发生开关量跳闸的误动作录波,故障为区外暂态 48 kA 的短路模拟,其中图 10(c) 横坐标乘以 833 μs 后即为对应的时间。图 10(a) 中第 1 条游标线对应的 2 台电流互感器的电流值差异十分明显,由图 10(c) 中的二次侧折合差电流波形也可定量观察出重合闸前后异常差动电流的变化过程。

变压器差动保护装置的动作电流整定值为 6 A,从差电流计算波形可看出,暂态衰减过程中的实时差电流瞬时值能够稳定在 5 A 以内。但故障后的前 2 个周期的差动电流值激增,装置内的抗饱和算法也无法适应本次饱和情况,从而导致区外故障误动,其两端电流互感器暂态饱和的差异性是导致误动作的重要原因。

4.2 电流互感器暂态饱和、再饱和过程

图 11 为某完整暂态通流过程,来自 10P20 型电流互感器录波电流,其二次侧负载为 7.848 Ω ,绕线

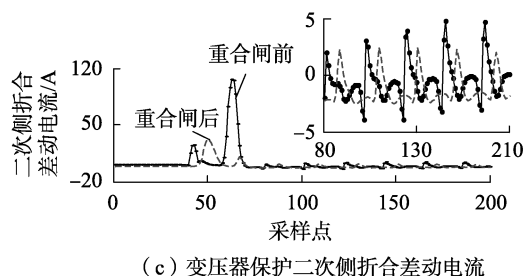
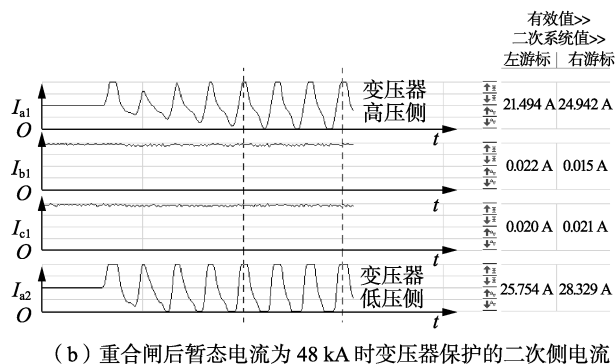
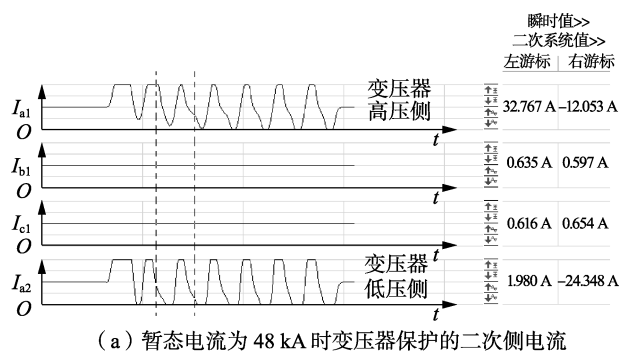


图 10 发生区外故障时变压器差动保护误动作的故障录波

Fig.10 Recording waveforms of misoperation of transformer differential protection under out-zone fault

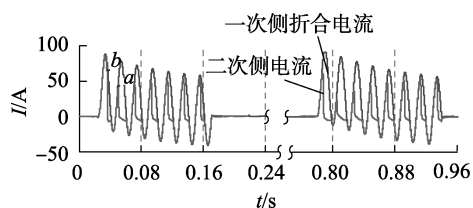


Fig.11 Recording waveforms of transient current at primary and secondary sides in full process

及电缆上的电感为 3.98 mH。一次侧的暂态通流环境为:

- 工频分量有效值约为 48 kA, 直流分量约为 80% 的稳态峰值, 衰减常数为 100 ms;
- 在暂态通流的过程中进行重合闸, 顺序为 150 ms 通流→600 ms 无电流→150 ms 通流。

电流互感器饱和的起始时间由一次侧故障电流水平、一/二次侧时间常数和剩磁水平等主要因素决定。暂态响应下, 饱和时刻的保守计算公式^[18-19]如式(6)所示。

$$t = -T_1 \ln \left(1 - \frac{K_s - 1}{X/R} \right) \quad (6)$$

其中, X 为一次侧系统到故障点的电抗; R 为一次侧系统到故障点的电阻; K_s 为饱和系数, $K_s = U_x/U_s$, U_x 为饱和电压, 考虑剩磁因素后, U_x 以式(7)进行估算, $U_s = I_s(R_s + R_B)$, I_s 为折合后的一次侧电流, R_s 为电流互感器内阻, R_B 为负载装置内阻。

$$U_x > \frac{I_s Z_s \left(1 + \frac{X}{R} \frac{R_s + R_B}{Z_s} \right)}{1 - P_{rm}} \quad (7)$$

其中, Z_s 为二次侧回路总阻抗; P_{rm} 为铁芯剩磁和饱和磁通的比值。

4.3 暂态系数

暂态系数 K_t 为电流互感器经受单次通电且假设二次回路时间常数 T_s 在整个通电期间保持不变时, 理论上的二次匝链总磁通与该磁通交流分量的峰值之比。 K_t 为电力行业标准中用于量化电流互感器的暂态特性的主要指标, 该值在标准 DL/T 866—2004《电流互感器和电压互感器选择及计算导则》^[20] 的 6.2 节中有明确的规定。

图 12 为对应图 11 重合闸后的暂态系数计算结果, 观察易得出该暂态饱和的量化计算不满足使用要求。0.8 s 前的 1 个周期为磁通上升的最高处, 但该区域的暂态系数小于 2.5, 且保持时间较短。根据上述暂态饱和评估结果, 建议更换暂态性能更优的 TP 级电流互感器。但考虑具体所接保护装置对暂态饱和的敏感性, 可进一步计算核查后依需求选择电流互感器^[21]。

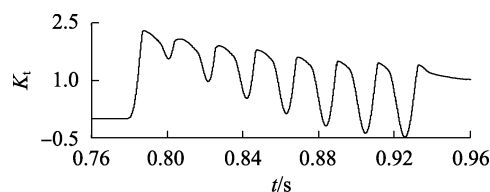


Fig.12 Calculative result of transient factor

330 kV 系统下装设的纵差或方向保护, 对电流互感器暂态误差十分敏感, 虽装置内含应对饱和区不误动的措施, 仍然建议更换所有暂态系数小于 2 的电流互感器装置^[22-23]。尤其是在带有重合闸工作模式的系统中, 如果重合于永久性故障, 电流互感器剩磁对保护误动的影响可能会更加恶化^[24-25]。

对于 330 kV 系统中其他类型的保护, 适当提高电流互感器的准确限制系数 (ALF) 可减轻暂态饱和的影响 (至少超过 2 倍的电流互感器额定电流), 暂态系数的更换建议值可略小于 2。因此, 可尽可能地避免暂态饱和对继电保护误动产生的影响, 但当

一次系统侧时间常数 T_1 较大时,虽然故障短路电流倍数不大,但暂态情况仍然严重,选择快速型保护时,应注意二次负荷与电流互感器特性的匹配。

5 结论

本文讨论了 330 kV/110 kV 系统下 P 级电流互感器的暂态饱和特性。对饱和影响因素进行了最基础、直观的试验验证,实证并分析了在短路通流高达 48 kA 的情况下,多组通流、二次负载下电流互感器的暂态饱和特性;同时,还针对试验中电流互感器所接的继电保护系统,从面向保护应用的角度,实证并计算了相关暂态饱和特性。具体如下:

a. 着重研究了 330 kV 系统中 P 级电流互感器模拟实际大电流下的通流试验,用最直观的形式展示了电流互感器饱和过程;

b. 定量地以试验探究的形式实证分析了电流互感器暂态饱和与再饱和的全过程,以及其影响因素的关系;

c. 实证分析了继电保护在电流互感器饱和时的动作特性,并以暂态系数作为保护应对电流互感器饱和的依据,为 330 kV 保护系统中的电流互感器选择提供了借鉴和参考。

参考文献:

- [1] 郑涛,陈佩璐,毛安澜,等. 地磁感应电流作用下的 CT 饱和特性及其引起的变压器差动保护误动[J]. 电网技术,2014,38(2): 520-525.
ZHENG Tao, CHEN Peilu, MAO Anlan, et al. Research on CT saturation characteristics affected by geomagnetically induced current and resulting malfunction of transformer differential protection[J]. Power System Technology, 2014, 38(2): 520-525.
- [2] 白加林,王宇恩,赵武智. 一起因 CT 饱和引起母线保护误动的事故分析[C]//2013 第十四届全国保护和控制学术研讨会. 郑州:中国电机工程学会,2013:1-8.
BAI Jialin, WANG Yuen, ZHAO Wuzhi. The analysis of an accident of bus protection maloperation caused by CT saturation[C]//The 14th National Academic Seminar on Protection and Control. Zhengzhou, China: CSEE, 2013: 1-8.
- [3] 谷君,郑涛,黄少锋,等. 变压器外部故障切除后差动保护误动原因及防止对策[J]. 中国电机工程学报,2009,29(16): 49-55.
GU Jun, ZHENG Tao, HUANG Shaofeng, et al. Mal-operation of transformer differential protection after removal of external fault and countermeasure[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(16): 49-55.
- [4] 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.
JING Minghui, KONG Xiaodi, QIN Songtao, et al. P current transformer saturation analysis of the causes and countermeasures[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(21): 94-97.
- [5] 毕大强,冯存亮,葛宝明. 电流互感器局部饱和识别的研究[J]. 中国电机工程学报,2012,32(31): 184-190.
BI Daqiang, FENG Cunliang, GE Baoming. Research on identification of partial transient saturation in current transformer[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(31): 184-190.
- [6] MICHAEL S, ZARKO D. The impact of current-transformer saturation on transformer differential protection[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2015, 30(3): 1278-1287.
- [7] EHSAN H, MEHDI V, MAJID S P. Current-transformer saturation compensation for transformer differential relays[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2015, 30(5): 2293-2302.
- [8] 刘中平,陆于平,袁宇波. 数字差动保护抗电流互感器饱和的线性区方案[J]. 电力系统自动化,2007,31(4): 66-70.
LIU Zhongping, LU Yuping, YUAN Yubo. Linear anti-saturation strategy of digital differential protection for current transformer[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 30(4): 66-70.
- [9] DASHTI H, SANAYE P M, DAVARPANAH M. Current transformer saturation detectors for busbar differential protection[C]//42nd International Universities Power Engineering Conference. Brighton, UK: IEEE, 2007: 338-343.
- [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 partial transient saturation caused by external fault removal[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(10): 12-17.
- [11] 郝后堂,史泽兵,江卫良. 重合于故障时 TA 饱和对差动保护的影响及对策[J]. 电力自动化设备,2013,33(4): 167-170.
HAO Houtang, SHI Zebing, JIANG Weiliang. Influence of CT saturation on differential protection during faulty line reclose and countermeasure[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(4): 167-170.
- [12] SMITH T, HUNT R. Current transformer saturation effects on coordinating time interval[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2011, 49(2): 825-831.
- [13] 麦克莱曼. 变压器与电感器设计手册[M]. 周京华,龚绍文,译. 北京:中国电力出版社,2014:65-149.
- [14] 张保会,郝治国, Zhiqian BO. 智能电网继电保护研究的进展(二)——保护配合方式的发展[J]. 电力自动化设备,2010,30(2): 1-4.
ZHANG Baohui, HAO Zhiguo, BO Zhiqian. Development of relay protection for smart grid(2): development of protection cooperation mode[J]. Electric Power Automation Equipment, 2010, 30(2): 1-4.
- [15] 郭相国,张保会. 自适应自动重合闸现状与发展[J]. 电力系统保护与控制,2004,32(16): 77-84.
GUO Xiangguo, ZHANG Baohui. Present achievements and prospects of adaptive auto-reclosure[J]. Power System Protection and Control, 2004, 32(16): 77-84.
- [16] 袁宇春,张保会. 多机电力系统中重合闸最佳时刻的研究:第 1 部分 瞬时性故障最佳重合时刻的研究[J]. 电力系统自动化,1998,22(4): 16-18.
YUAN Yuchun, ZHANG Baohui. Study on the optimal reclosing time in multi-machine power system part one study on the optimal reclosing time at instantaneous fault[J]. Automation of Electric Power Systems, 1998, 22(4): 16-18.
- [17] 张小庆,张宜阳,薛建,等. 电流互感器大电流饱和测试技术研究[J]. 电网与清洁能源,2016,32(7): 58-64.
ZHANG Xiaoqing, ZHANG Yiyang, XUE Jian, et al. Research on saturation test under high current for current transformers[J]. Power System and Clean Energy, 2016, 32(7): 58-64.
- [18] IEEE. IEEE guide for the application of current transformers used for protective relaying purposes; IEEE Std C37.110[S]. New York, USA: Power System Relaying Committee, 2008.
- [19] IEEE Power Engineering Society. Transient response of current

- transformers[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and System, 1977, 96(6): 1809-1814.
- [20] 电力行业电力规划设计标准化技术委员. 电流互感器和电压互感器选择及计算导则: DL/T 866—2004[S]. 北京: 中国电力出版社, 2004.
- [21] 沈阳变压器研究所. 保护用电流互感器暂态特性技术要求: GB 16847—1997[S]. 北京: 中国标准出版社, 1997.
- [22] 全国电磁计量技术委员会. 电力互感器: JJG 1021—2007[S]. 北京: 中国计量出版社, 2007.
- [23] 苏毅, 屠黎明, 盛和乐, 等. 电力互感器深度饱和时保护性能研究和参数选择[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(19): 100-104.
SU Yi, TU Liming, SHENG Heyue, et al. Protection performance study and parameter selection when current transformer deeply saturated[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(19): 100-104.
- [24] 崔迎宾, 谭振宇, 李庆民, 等. 电流互感器剩磁影响因素和发生规律的仿真分析[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(23): 87-91.
CUI Yingbin, TAN Zhenyu, LI Qingmin, et al. Current transformer remanence influencing factors and occurrence regularity of simulation analysis[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(23): 87-91.
- [25] 李长云, 李庆民, 李贞, 等. 直流偏磁条件下电流互感器的传变特性[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(19): 127-132.
LI Changyun, LI Qingmin, LI Zhen, et al. Transfer characteristics of current transformers with DC bias[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(19): 127-132.

作者简介:



段建东

段建东(1973—),男,湖南武冈人,教授,博士,研究方向为电力系统分析、继电保护、新能源接入技术等(E-mail: duanjdd@xaut.edu.cn);

雷 阳(1993—),男,陕西旬阳人,硕士,主要从事变压器互感器的建模、电力系统继电保护方面的研究工作(E-mail: lei_yang_ly@163.com)。

Empirical analysis on transient saturation characteristic of current transformer

DUAN Jiandong¹, LEI Yang^{1,2}, JIN Zhuanting¹, ZHANG Xiaoqing³, ZHANG Yiyang³, LI Yunge³

(1. Department of Electrical Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China;

2. Xi'an Thermal Power Research Institute Co., Ltd., Xi'an 710054, China;

3. State Grid Shaanxi Electric Power Research Institute, Xi'an 710054, China)

Abstract: Aiming at the transient saturation problem of P-level CT (Current Transformer) in power system, the operation of CT in 330 kV / 110 kV short circuit system is simulated. Under the transient flow up to 48 kA, the transient saturation characteristics of CT are discussed and empirically tested by exploratory tests. For the application of transient saturation characteristics, the differential relays are also considered in the experiment for the misoperation analysis of relay protection. According to the transient coefficient, the judgment basis for the selection of P-level CT for protection is given. Under the actual empirical analysis of the CT transient characteristics, the obtained conclusions give a reference basis for the safety and stability of the P-level CT in the system operation.

Key words: P-level current transformer; transient saturation; high-current test; saturation characteristics application

(上接第 199 页 continued from page 199)

Coordinated droop control strategy considering indifference regulation of DC voltage for MMC-MTDC system

ZHU Hongqi, LI Yong, WANG Ziya, LI Chang, CAO Yijia

(College of Electrical and Information Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract: The stable DC voltage is crucial for the safe and reliable operation of MTDC (Multi-Terminal Direct Current) transmission system. A novel coordinated droop control strategy is proposed. The equivalent network model of MTDC system is built, and a small-signal based analytical expression is derived. The small-signal compensation term is injected into the conventional droop control to realize the indifference regulation of DC voltage in various operation conditions. The simulation model of four-terminal DC system based on modular multilevel converter is established by PSCAD/EMTDC. The simulative results validate the effectiveness of the proposed method. DC voltage will return back to the initial steady operation point under the disturbance with the proposed control method, which avoids the static error of DC voltage caused by the conventional droop control method, and implements the DC voltage operation under the rated value.

Key words: MTDC system; droop control; small signal; indifference regulation